



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Heiko Kaljuvee

**EESTI JÕGEDE HÜDROENERGEETILISE POTENTSIAALI
ARVUTAMINE**

**CALCULATION OF THE HYDROENERGETICAL POTENTIAL
OF ESTONIAN RIVERS**

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Vesiehitus ja veekaitse õppekava

Juhendaja: nooremteadur Ottar Tamm; MsC

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Heiko Kaljuvee		Õppekava: Vesiehitus ja veekaitse	
Pealkiri: Eesti jõgede hüdroenergeetilise potentsiaali arvutamine			
Lehekülgi: 56	Jooniseid: 30	Tabeleid: 2	Lisasid: 3
Osakond / Õppetool:		Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Keskkonnatehnoloogia (T270); Hüdrogeoloogia (P470)	
Juhendaja(d):		Nooremteadur Ottar Tamm	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2018	
<p>Euroopa Liit ja Eesti selle liikmena tähtsustavad taastuvenergia tootmise osakaalu kasvu. Hüdroenergia on üks taastuvatest energiaallikatest, mille täit potentsiaali pole erinevatel hinnangutel Eestis hetkel veel kasutusele võetud.</p> <p>Töö põhieesmärgiks on hinnata üleüldist hüdroenergeetilist potentsiaali Eestis, kasutades ArcGIS tarkvara. Lisaks Eesti jõgede hüdroenergeetilise potentsiaali arvutamisele otsiti ka perspektiivikaid hüdroelektrijaamade asukohti. Leitud kohti võrreldi kasutusel olevate hüdroelektrijaamadega, et hinnata metoodika täpsust ja sobivust Eesti tingimustes.</p> <p>Hüdroenergeetilise potentsiaali määramisel kasutati kõiki Eesti jõgesid pikkusega üle 25 km. Antud kriteeriumile vastavad jõed jagati omakorda 500 meetrilisteks lõikudeks, kuhu genereeriti virtuaalsed hüdroelektrijaamad (VHEJ). Igale VHEJ-le arvutati jaama võimsus. Selleks kasutati 10 meetrilise resolutsiooniga kõrguskaarti ja Eesti jõgede äravoolumooduli kaarti. Antud töös pole arvestatud keskkonnavalaseid piiranguid (rahvuspargid, looduskaitsealad jne.). Lõputöös kasutati hüdroenergeetilise potentsiaali arvutamiseks kokku 117 jõe andmeid.</p> <p>Töö käigus leiti erinevatel jõgedel hulgaliselt soodsaid kohti hüdroenergia tootmiseks, kus tänapäeval hüdroenergia tootmist veel ei toimu. Eesti hüdroenergeetiliseks potentsiaaliks hinnati umbes 70 MW. Seega on Eestis hetkel kasutusel ligikaudu 13% kogu Eesti hüdroenergeetilisest potentsiaalist.</p>			
Märksõnad: ArcGIS, taastuvenergia, väikehüdroenergia, hüdroelektrijaam, hüdroenergeetiline potentsiaal			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Heiko Kaljuvee		Speciality: Hydraulic Engineering and Water Pollution Control	
Title: Calculating of the hydroenergetical potential of Estonian rivers			
Pages: 56	Figures: 30	Tables: 2	Appendixes: 3
Department / Chair:		Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERC S) code:		Enviromental technology (T270) Hydrogeology (P470)	
Supervisors:		Junior researcher Ottar Tamm	
Place and date:		Tartu, 2018	
<p>The European Union (EU) and Estonia as part of the EU, seeks to increase the share of energy production from renewable sources. Hydropower is one of the renewable energy sources, which full potential in Estonia, according to different opinions, is not yet used. The main objective of this work is to assess the overall hydro-energy potential in Estonia using ArcGIS software. In addition to hydroenergetic potential calculations, prospective hydroelectric power stations were also sought. Potential hydroelectric locations were then compared to existing hydroelectric plants to assess the accuracy and suitability of the methodology in Estonian conditions.</p> <p>In determining the hydropower potential, all Estonian rivers with length more than 25 km, were used. Rivers that met the criterion were then divided into 500 metric sections, to where then were generated virtual hydroelectric power stations. For each virtual power plant, the capacity of the station was calculated. This was made using drainage module and digital elevation map with 10-meter resolution. This work does not include environmental constraints like national parks and natural reserve parks. A total of 117 river's data was used to calculate the hydropower potential.</p> <p>During the project, there were found a lot of favorable places for hydropower production in different rivers. Estonia's hydroelectric potential was estimated for 70 MW. Currently, about 13% of the total hydro-energy potential is used in Estonia.</p>			
Keywords: ArcGIS, hydroenergy, small hydropower, hyropower plant, hydroenergetical potential			

SISSEJUHATUS.....	6
1. HÜDROENERGIA	9
1.1 Hüdrolektri jaam.....	10
1.2 Pumpe-hüdrokeumulatsioonijaamad	11
1.3 Väikehüdrolektri jaamad	12
2. HÜDROENERGIA POTENTSIAALI ARVUTAMISE METOODIKA	13
2.1 Kõrguskaardi puhastamine	14
2.2 Jõgede loomine.....	16
2.3 Virtuaalsete HEJ loomine ja nende valgalade piiritlemine	19
2.4 Töörõhu H ja vooluhulga Q arvutus virtuaalsetele HEJ-le	20
2.5 Tegevuse automatiseerimine	23
3. TULEMUSED.....	24
3.1 Metoodika efektiivsuse kontroll.....	24
3.1.1 VHEJ vahekauguste määramine.....	24
3.1.2 Kõrguskaarti resolutsiooni valik	25
3.2 VHEJ võimsuste võrdlemine Pärnu jõe näitel.....	27
3.3 VHEJ võimsuste võrdlemine Keila jõe näitel	29
3.4 VHEJ võimsuste võrdlemine Võhandu jõe näitel	31
3.5 VHEJ võimsuste võrdlemine Jägala jõe näitel	35
3.6 Hüdrokeenergeetiline potentsiaal Eestis	38
3.6.1 Harjumaa	40
3.6.2 Pärnumaa	41
3.6.3 Läänemaa	42
3.6.4 Ida-Virumaa	42
3.6.5 Võrumaa	42
3.6.6 Põlvamaa	42
3.6.7 Tartumaa.....	43
3.6.8 Jõgevamaa	43
3.6.9 Viljandimaa	43
3.6.10 Valgamaa.....	44
3.6.11 Raplamaa.....	44
3.6.12 Lääne-Virumaa.....	44
3.6.13 Järvamaa.....	45
3.6.14 Saaremaa ja Hiiumaa.....	45
4. DISKUSSIOON	47
KOKKUVÕTE.....	49

KASUTATUD KIRJANDUS	51
Lisad.....	54
Lisa 1. Hüdroelektrijaamade arv Euroopa riikides	54
Lisa 2. Eesti hüdroenergeetilise potentsiaali paiknemine maakonniti	55
Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	56

SISSEJUHATUS

Väikeseid veejõujaamu on maailmas rajatud juba sajandeid. Alguses kasutati vesirattaid mehaaniliste tööde tegemiseks, näiteks vilja jahvatamiseks. Esimene veeturbiin leiutati Prantsusmaal 1827. aastal. Aastate jooksul paljud kosed on kohandatud ümber hüdrojõujaamadeks.

Kogu maailmas on hinnanguliselt veel kasutamata potentsiaalset hüdroenergiat umbes 15000TWh/s (Bartle, 2002). Antud energia kättesaamine eeldaks mahukaid uuringuid ning kalleid suuremahulisi arendusi. Isegi kui füüsiliselt oleks võimalik hüdroelektrijaam (HEJ) toimima panna, siis igale poole ei ole selle rajamine majanduslikult otstarbekas. HEJ rajamise kulutused on suuremad, kui seda on tuule- ja päikeseenergiajaamadel. Samas jällegi on edaspidised hoolduskulud hüdroelektrijaamadel tunduvalt väiksemad. Samuti on elektrit tootvate jaamade seast pikim eluiga just HEJ-del.

Hüdroenergia jaamad on kasutusel olnud võrreldes teiste elektrijaamadega kõige pikemat aega. Kuid sellegipoolest umbes 70% majanduslikult otstarbekat hüdroenergiat on kasutusele võtmata (Bartle, 2002).

Hüdroenergia areng Euroopas on aeglustunud, kuid siiski ehitatakse hüdroelektrijaamasid. Paljudel juhtudel on selleks vanade jaamade rekonstrueerimine. Uuringu tulemusena leitis, et järgmise 20 aasta jooksul on võimalik tõsta hüdroenergia tootlikust ligi 27% (US National hydropower association). Antud potentsiaalne tootlikkuse suurenemine tulekski vanade HEJ-de rekonstrueerimise arvelt.

Suuremat huvi hüdroenergia tootmise suurendamise vastu tekitab ka Euroopa Liidu poolt püstitatud ambitsioonikad eesmärgid. Aastaks 2030 on ette nähtud, et vähemalt 27% kogu energia toodangust Euroopa Liidus pärineks taastuvatest energiaallikatest. Antud kriteeriumi on suutnud täita juba mõned Euroopa riigid nagu näiteks Austria, Hispaania, Norra ja ka Rootsi. Aastaks 2050 plaanitakse minna 100% taastuvale energiale. Hinnanguliselt on see võimalik, kuna taastuva energia potentsiaal on kordades suurem, kui praegune energiavajadus Euroopas (François et al., 2016). Kahjuks pole energia kättesaadavus riikide vahel võrdselt jaotunud. Lisaks sõltub taastuvenergia tootmine suurel määral ilmast. Üheks lahenduseks oleks kombineerida tuule, päikese ja hüdroenergiat, et vähendada sõltuvust ainult ühest taastuvenergia liigist (François et al., 2016).

Inimestel on alati olnud arvamus, et kõik rajatud paisud on seotud hüdroenergia tootmisega. Tegelikult on vaid 20% maailmas rajatud paisudest ehitatud spetsiaalselt hüdroenergia tootmise jaoks. Ülejäänud paisudest on rajatud hoopis muul eesmärgiks. Enamjaolt kas virgestuseks, veevarustuseks või siis niisutusvee saamiseks. Paljudel juhtudel on hiljem paisud kohandatud ümber tootma ka hüdroenergiat (Bartle, 2002).

Eestis toodetakse ligikaudu 90% kogu elektrienergiast Narva lähistel kahes põlevkivi kütust kasutavas soojuselektrijaamas.–Installeeritud võimsused 2015.a Eesti Elektrijaamas on 1355 MW ja Narva Elektrijaamas 322 MW (Jaanus Uiga, 2016). Eesti on Pariisi kliimakokkuleppe ja 2014. aasta Euroopa Liidu kliimapoliitika eesmärkide raames lubanud, et lõpetab madala efektiivsuse tõttu põlevkivi otsepõletamise elektritootmise eesmärgil juba 2030. aasta perspektiivis (Pau, 2016).

Üks suurimaid taastuvenergia potentsiaale võib peituda bio-massis. Teoreetiliselt on Eestis võimalik toota biomassi 3,7 miljoni hektari suurusel alal (Joint research centre 2018). Antud biomassi energia potentsiaal on hinnanguliselt 20 TWh/a (Lahtvee, 2003). Tuuleenergiast toodetakse elektrit erinevates tuuleparkides, kus 2016.aasta seisuga oli Eestis võrku ühendatud kokku 139 tuulikut, koguvõimsusega 307 MW.–Tuulepargid tootsid 2016. aastal kokku 589 GWh elektrienergiat, mis on kogu taastuvenergia toodangust 41,7% (Tuuleenergia Eestis).

Kuigi Eesti kuulub keskmise äravoolu poolest suhteliselt veerikkasse piirkonda, pärineb Eestis kogu taastuvenergia toodangust vaid 2-3% hüdroenergiast. Selle tingib keskmiselt väike lang Eesti jõgedel suhteliselt tasase pinnamoe tõttu. Hüdroenergia toodang oli 2016 aastal Eestis 35 GWh, moodustades taastuvatest allikatest pärinevast elektritoodangust vaid 2,5% (Elering 2017). Eesti riik tähtsustab üha enam kasvuhoonegaaside heitkoguste vähendamist ja taastuvenergia osakaalu tõstmist energiatootmises. Veejõu viimase aja kasutuselevõtu tempo on keskmiselt 0,4–0,5 MW aastas (Raesaar, 2005).

Veejõu kasutamist on tuntud Eestis juba vähemalt 13. sajandist. Esimene teadaolev vesiveski on Kohila veski, aastast 1219 Jõelähtme jõel. Esimesed hüdroelektrijaamad ehitati 19. sajandi lõpul. Enne Teist Maailmasõda oli veejõu osatähtsus Eesti üldises energiabilansis küllalt suur, moodustades 28,2% elektrijaamade kogutoodangust. Antud perioodil viidi läbi ulatuslikke uuringuid hüdroenergeetiliste ressursside väljaselgitamiseks ning koostati projekte veejõu kasutusele võtuks. 1940. a oli Eestis töös 921 turbiini ja vesiratast koguvõimsusega 27,5 MW. Sõja ajal enamik veejõuseadmeid aga paraku hävinesid (Raesaar, 2005).

Pärast teist maailmasõda, aastatel 1945-1950 paljud veejõuseadmed taastati ning ehitati ka hulgaliselt uusi. 1949. a oli hüdroelektijaamade koguvõimsuseks 1140 kW. Seoses põlevkivienergeetika arenguga, tunnistati vee energia ebaperspektiivseks ning paljud jaamad jäeti seisma. Uus huvi HEJ vastu tekkis alles pärast Eesti taasiseseisvumist (Andres *et al.*, 2011).

Kuni aastani 2001 oli HEJ võimsused Eestis üsna kesised. Aastal 2001 hakkas Eesti Energia tootma elektrit äsja renoveeritud Linnamäe hüdroelektijaamas, mis asub Jägala jõel. Jaama võimsuseks on 1.13 MW. Aastal 2003 avati Kunda ja Kaarli hüdroelektijaam tänu millele kogu paigaldatud võimsus küündis 3,8 MW'ni (Hüdroelektijaam, 2016).

Autori tänusõnad kuuluvad lõputöö juhendajale nooremteadur Ottar Tammele Eesti Maaülikoolist:

Käesoleva lõputöö põhieesmärgiks on arvutada välja Eesti jõgede hüdroenergeetiline potentsiaal, kasutades sellejaoks ArcGIS tarkvara. Põhiliseks eesmärgiks on vooluhulkade ning tööõhu kaudu määrata hüdroenergeetiline potentsiaal kõigil jõgedel, mille pikkus on vähemalt 25 km. Jõed koostatakse kasutades ArcMap'i siseseid töövahendeid. Jõed jagatakse võrdseteks lõikudeks ning seejärel leitakse hüdroenergeetiline potentsiaal igale tekkinud lõigule. Lisaeesmärgiks on analüüsida jõgedel tekkivaid suure potentsiaalse võimsusega asukohti ning võrrelda neid tegelikkuses esinevate HEJ asukohtadega.

1957. a välja antud Eesti taastuva energia ja energiasäästu ressursi hinnangus on Eesti hüdroenergeetiline potentsiaali suuruseks hinnatud ilma Narva jõeta 30-60 MW (Raesaar, 2005). Antud lõputöö eesmärgiks on kaasajastada hüdroenergeetilise potentsiaali hinnangut Eesti jõgedel.

1. HÜDROENERGIA

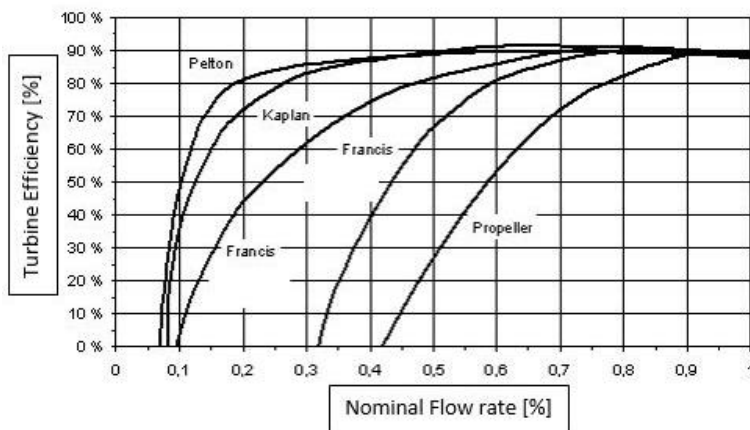
Hüdroenergia on mehaanilise energia liik, mis vabaneb vee vabal langemisel maa raskusjõu mõjul. Hüdroelektrijaama võimsuse arvutamiseks on üldvalemi järgi vajalik teada nelja parameetrit (Valem 1.1.). Esiteks on vajalik teada üla- ja alaveetaseme vahe ehk netorõhk H (m). Teiseks on vaja teada vooluhulka Q (m³/s). Teoreetiline veejõud arvutatakse korrutades omavahel vooluhulga Q ja kõrguste vahe H raskuskiirendusega g (m/s²). Kolmandaks tuleb teoreetiline veejõud korrutada kasuteguriga η . Hüdroenergia arvutamise valem on:

$$P = g \cdot H \cdot Q \cdot \eta, \quad (1.1.)$$

kus P on jaama võimsus kW;

H	-netorõhk m;
Q	-vooluhulk m ³ /s;
g	-raskuskiirendus m/s ² ;
η	-kasutegur %.

Kasutegur sõltub turbiini läbivast vooluhulgast, turbiini tüübist ning mehaanilise energia elektrienergiaks muundamise efektiivsusest. Levinum turbiini tüüp Eesti hüdroelektrijaamades on Kaplan-tüüpi turbiin. Seda eelkõige teema efektiivsuse tõttu väikese vooluhulga ja netorõhu juures. Kaplan tüüpi turbiinile iseloomulikku efektiivsust näitab pööratavate labadega Kaplan turbiini efektiivsuskõver (Joonis 1.1). Muundamise kasutegur, mis arvestab kadusid turbiinis, ülekandes ja generaatoris ning selle väärtus on tavaliselt vahemikus 60-80% (Hüdroelektrijaama rajaja käsiraamat, 2014).



Joonis 1.1. Turbiinide efektiivsuskõverad (Quaschnig, 2015)

1.1 Hüdrolektriijaam

Hüdrolektriijaamasid on võimalik liigitada erinevate parameetrite järgi. Eestis toodetakse hüdroenergiat jõge läbiva veehulga pealt, sisuliselt puudub vee kogumine või on see maailma mõistes olematu (v.a. Narva HEJ). Hüdrolektriijaamasid klassifitseeritakse tööõhu järgi:

- Kõrge 100 m ja rohkem
- Keskmine 30-100 m
- Madal 2-3 0m

Kuna Eestis on tegu üsna tasase reljeefiga, kategriseeruvad kõik HEJ-d tööõhu järgi madalateks. Eesti suurima tööõhuga HEJ on Jägala jõe alamjooksul asuv Linnamäe HEJ, mille tööõhuks on umbes 10 meetrit. Lisaks tööõhule on üsna levinud HEJ liigitus vastavalt HEJ võimsusele:

- Suured: >100 MW
- Keskmised: 10 – 100 MW
- Väikesed: 1 - 10 MW
- Mini: 100 KW - 1 MW
- Mikro: 5 – 100 KW
- Piko: < 5 KW

Eestis puuduvad suured ja keskmised HEJ-d. Eesti suurim Linnamäe HEJ klassifitseerub võimsuse liigituse järgi väikese HEJ klassi. Ülejäänud Eesti HEJ-d liigituvad kas mini või mikro võimsusega klassi. Piko HEJ-d on paigaldatud enamasti eratarbeks ja on piisavalt väikesed, et nende täpne arv pole teada. Lisaks võimsusele ja tööõhule on kolmandaks levinumaks HEJ liigituse aluseks HEJ ehituse tüüp:

- Jõgede läbijooksust saadud energia
- Paisutatud tasemega, kus generaator on paisu jalamil
- Laineenergia: mehaanilise energia liik, mis vabaneb mere taseme kõikumisel lainetuse tekkimisel
- Pumpe-hüdroakumulatsioonijaam

1.2 Pumpe-hüdroakumulatsioonijaamad

Eestis tingimustes on suurim HEJ potentsiaal just pumpe-hüdroakumulatsioonijaamadel (PHAJ). PHAJ rajamine on üheks soodsaimaks lahenduseks mitteregulaaritava võimsusega elektrijaamade poolt toodetud energia pikaajaliseks ja suuremahuliseks salvestamiseks. Mittereguleeritav jaam on otseselt energiaallika intensiivsusest sõltuv elektrijaam nagu näiteks tuulegeneraator või päikesepaneel mille tootlikus sõltub ilmastikust. PHAJ on energiabilansis elektrienergia tarbija ning jaama ehitamise tehniline eesmärk seisneb elektrienergia tootmise ja tarbimise omavahelises ajalises optimeerimises elektrisüsteemis. PHAJ on väga kiire võimsuse reguleerimisvõimekusega ja suutlik teiste mittereguleeritavate elektritootjate ebaühtlast elektritootmist ja aeglast reguleeritavust kompenseerima. Aeglase reguleeritavusega jaamadeks loetakse soojuselektrijaamu ning tuumajaamasi. PHAJ-sid kasutatakse lisaks elektriturul osalemisele tihti ka avariireservina, reguleerimisenergia tootjana ning sageduse hoidmisega seotud ülesannete täitjana elektrisüsteemides. Euroopa elektrisüsteemis, milles on järjest rohkem mittejuhitava võimsusega elektritootmisüksusi, on suuremahuliste ja pikaajaliste energiasalvestite olemasolu energia varustuskindluse seisukohast oluline. Ka Eestis on suuremahulise salvestusvõimaluse oluliseks eelduseks taastuvatest energiaallikatest laialdane energiatootmine. PHAJ rajamine aitab kaasa Balti elektrisüsteemi sünkroniseerimisele ülejäänud Euroopa elektrisüsteemiga. Lisaks elektrienergia suuremahulisele ja pikaajalisele salvestamisele, seisneb PHAJ eelis võimaluses süsteemi koormust kiirelt muuta tulenevalt nõudlusest või elektri ööpäevasest hinnakõikumisest.

Jaama tööpõhimõte seisneb mere pinna ja maa-aluse reservuaari kõrguste vahest tekkiva vee potentsiaalse energia ärakasutamises. Elektrienergiat tarbitakse, kui vett pumbatakse alumisest reservuaarist ülemisse ning elektrienergiat toodetakse siis kui vett lastakse ülemisest reservuaarist läbi turbiinide alumisse reservuaari. Seda tehakse juhul kui süsteemis on elektritootmisvõimsuse puudujääk või elektri hind ööpäeva hinnakõikumise tõttu kõrgem. Šahti allosas paiknevas turbiinisaalis paiknevad elektriturbiinid/pumbad, mis vastavalt töörežiimile toodavad elektrit või pumpavad vett reservuaarist tagasi merre. Summaarselt on pump-hüdroakumulatsioonijaam elektrisüsteemis elektritarbija, kuna energia muundamiseks tehakse tööd ja hiljem hüdro-energiana kätte saadav elektrienergia on kadude tõttu väiksem (Tambets, Järvekülg and Tambets, 2007).

1.3 Väikehüdroelektrijaamad

Väikehüdroelektrijaamad on ülesehituslikult lihtsad, töökindlad ja lihtsalt käideldavad, mille töös hoidmine ei vaja eri väljaõpet. Põhikriteeriumiks väikehüdroelektrijaamades vee energia tootmisel on tekitada võimalikult suur veesurve, et veehaardekanali või survetoru kaudu jõesängist kõrvale juhitud vesi voolaks turbiinile ja sealt allavoolu tagasi jõkke. Väikehüdrojaamad on peamiselt läbijooksu jaamad ning seetõttu ei vaja nad suuri veehoidlaid.

Väikehüdrojaamade võimsuse ülemist piiri määratletakse riigiti erinevalt (1,0 – 25 MW), kuid üldiselt on aktsepteeritavaks piiriks 10 MW. Antud liigituse on heaks kiitnud ka Euroopa Väikehüdroenergia Assotsiatsioon (ESHA). Eestis on kokku 47 töötavat hüdroelektrijaama, millest vaid üksikud saab väikehüdroelektrijaamade alla liigitada. Enamik hüdroelektrijaamu on mini- või mikrohüdroelektrijaamad (Lisa 1).

2. HÜDROENERGIA POTENTSIAALI ARVUTAMISE METOODIKA

Viimase aastakümne jooksul on hüdroenergia tootmise arendamiseks ja asukohtade valikuks välja töötatud mitmesuguseid arvutipõhiseid hindamisvahendeid. See võimaldab arendajale enne suurte rahasummade investeerimist anda esialgne hinnang projekti majanduslikule teostatavusele (Punys *et al.*, 2011).

Suure tõuke andis just geograafiliste infosüsteemide (GIS) kiire areng. Maailmas kasutatakse erinevaid määratlusi GIS'i kohta. Käesolevas töös võib seda kirjeldada riistvara, tarkvara ja andmete integreerimise süsteemina kõigi geograafiliselt viidatud teabe hankimiseks, haldamiseks, analüüsimiseks ja kuvamiseks. GIS võimaldab analüüsida ja visualiseerida erinevaid ruumilisi andmeid kiiresti ja lihtsalt. Seega on tegu võimsa vahendina, millega näiteks vesikondasid analüüsida ja visualiseerida (Punys *et al.*, 2011).

Kõigepealt hakati GIS-i kasutama maa-ja metsauuringute läbiviimisel. Hiljem hakati kasutama GIS süsteeme edukalt ka veevarude ja jõevõrkude analüüsiks ja visualiseerimiseks. Suurbritannias kasutati GIS'i hüdroenergeetilise potentsiaali hindamiseks sealsetes jõgedes (Manzano-Agugliaro *et al.*, 2017). Kuna see osutus kiireks ja lihtsalt mooduseks, siis on seda korratud paljudes riikides ning paljudel juhtudel avalikustatakse info kõigile.

Usaldusväärne hinnang majanduslikult teostatavale projektile eeldab ka mõningaid kohapealseid uuringuid, sellepärast on GIS tarkvara olnud laialdaselt kasutatav kui analüüsimise tööriist.

GIS programmi abil tehtud uuringuid ei piirdu ainult Euroopa ja USA'ga, uuringuid tehakse üle kogu maailma. GIS tehnoloogiat on kasutatud sobilike hüdroelektrijaama asukohtade leidmiseks isegi Tansaania, kus andmete kvaliteet ja ka kättesaadavus on piiratud (Punys *et al.*, 2011).

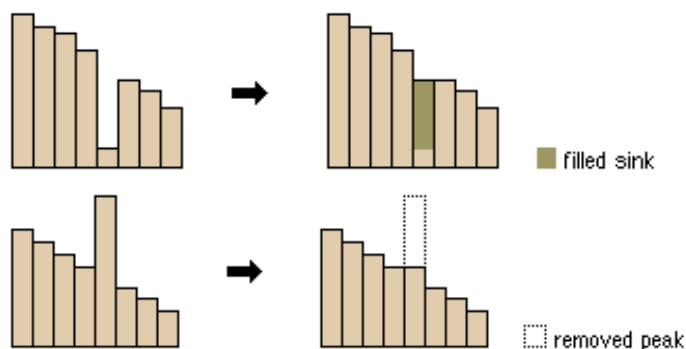
Antud töös kasutatakse ESRI ArcMap 10.3 programmi, millele on lisatud ArcHydro laiendus. ArcHydro laiendus on kokku kogutud hüdroloogia tööriistade komplekt, mis lihtsustab oluliselt voolusuundade ning valgalade leidmist (Arc hydro overview, 2017).

Lõputöös kasutatakse ühe sisendina kõrguskaarti, mis kõigepealt puhastatakse müra. Puhastatud kõrguskaardi pealt määratletakse voolamise suund ja vee voolamise suund ja massid. Järgmisena määratletakse vee voolamise masside järgi lõputöös huvipakkuvad

vooluveekogud, milledele määratakse iga kindla vahemiku tagant virtuaalsed hüdroelektrijaamade asukohad. Nimetatud jaamadele arvutatakse alamvalgalad ja nende suurused. Jaama võimsuse arvutamise üheks komponendiks on tööõhk H ehk otsitavad hüdroelektrijaama ja sellest allavoolu jääva järgmise hüdroelektrijaama kõrguste vahe. Teiseks komponendiks on vooluhulk Q , mis leitakse Eesti jõgede äravoolumooduli kaardikihi pealt. Iga jaama kasuteguriks määratakse 70%. Seega korrutades kokku iga virtuaalse hüdroelektrijaama vooluhulga Q , tööõhu H ja kasuteguri, saadakse igale otsitavale virtuaalsele hüdroelektrijaamale otsitav võimsus P .

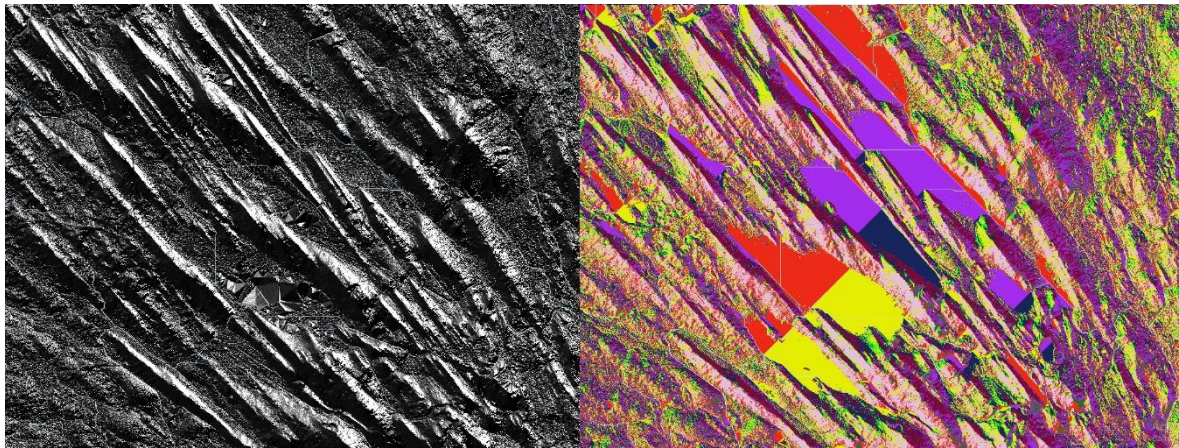
2.1 Kõrguskaardi puhastamine

Ühe vajaliku sisendina antud metoodikas kasutatakse kõrguskaarti (DEM). Kõrguskaardi koostamisel kasutatakse andmete töötlemist, mille käigus võivad tekkida tehnilise arvutuse käigus lohud ja künkad, mis ei kirjelda tegelikku olukorda looduses. Lohk on madalaim punkt, mida ümbritsevad punktid asuvad kõrgemal (joonis 3.3). Ebaloomulike lohude esinemisel lõppeksid veevoolukogud antud punktides ning vesi jääks sinna „kinni“. Töövahend „Fill“ täidab need ebaloomulikud lohud. Joonisel 3.3 on näidatud lohude ja küngaste silumise põhimõte.



Joonis 2.1. Lohkude ja küngaste silumine. Allikas: ArcGis desktop 9.3 Help (12.05.2017)

Antud „silumise“ vajalikkust saab tähendada Vooremaal, kus „Fill“ käsklus on voorestiku vahelised nõod ära täitnud (Joonis 2.2). Täidetud kohad on nähtavad ühte tooni massiividena. Tegelikult asub antud asukohas Saadjärv koos oma naaberjärvedega (Joonis 2.3). Antud juhul on tegu ArcMap'i poolt korrektse käitumisega ning vooluvesi lohkudesse seisma ei jää.



Joonis 2.2. Neelukohtade täitmine Vooremaal „Fill“ töövahendiga.

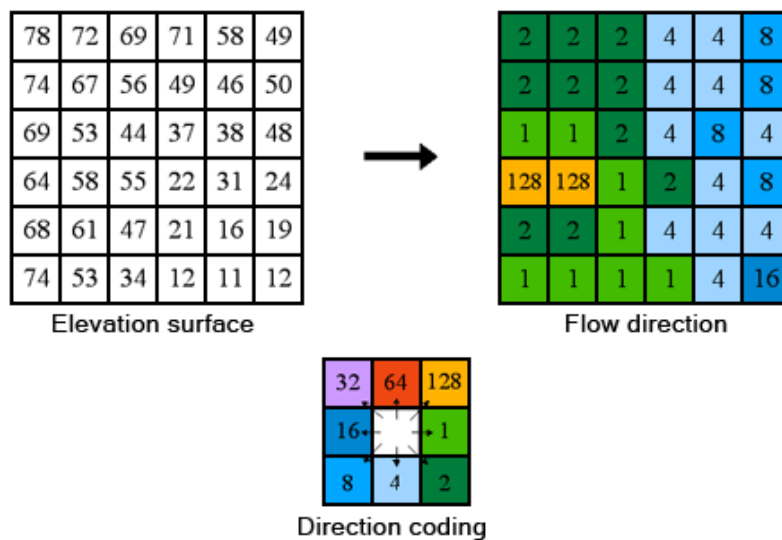
Fill töövahendiga võivad tekkida ka mõningad ebatäpsused. Mõni lohk võib esineda ka tegelikkuses, kuid töövahend saab aru sellest kui ebaloomulikust kujustisest ning täidab selle. Tänu sellele võib mõni veevoolukogu kuju poolest mõnevõrra erineda Arcmap programmis võrreldes tegelikkusega. Selliste vigade hulk sõltub DEM kaardi resolutsioonist ja ka kõrguserinevuste suuruselt. Nimetatud erinevused tekivad just jõgede alguses, kus antud metoodikat kasutades ei oma antud tehniline puhastamine suurt rolli. Seda seepärast, et jõgede alguses pole piisavalt vooluhulka, et sinna HEJ-a rajada.



Joonis 2.3. Järved Vooremaal. Allikas: Google maps (12.05.2017)

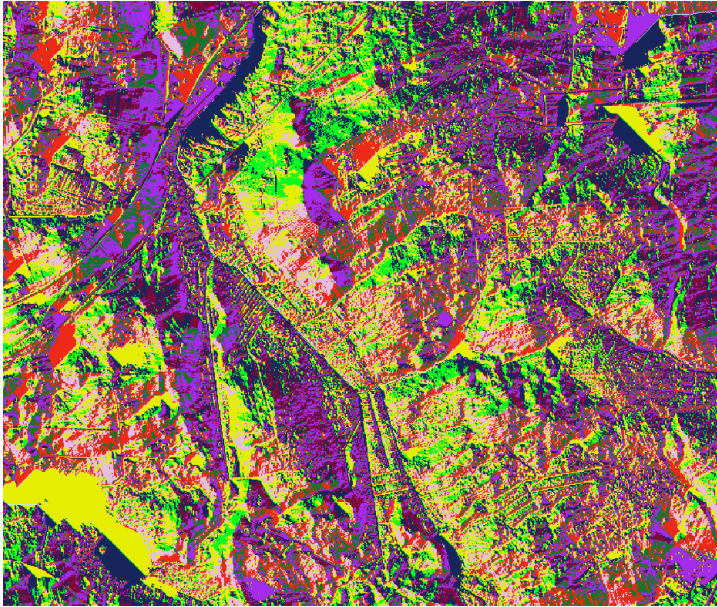
2.2 Jõgede loomine

Peale kõrguskaardi tehnilist puhastamist on vaja määratleda kõrguskaardi pealt jõgede asukohad. Selleks määratakse iga punkti voolusuund töövahendiga „*Flow Direction*“. Kõiki punkte ümritsevad omakorda järgmised kaheksa punkti, mille suunas vesi liikuda saab (Joonis 2.4). Seda lähenemisviisi nimetatakse D8 voolumudeliks.



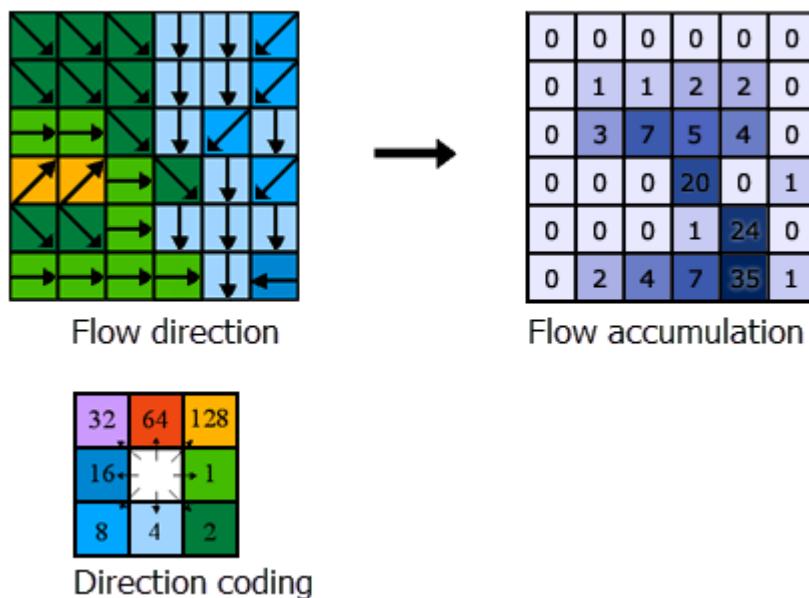
Joonis 2.4. Punktide voolusuuna määramine Allikas: ArcGis desktop 9.3 Help (12.05.2017)

Igale punktile määratakse liikumise suund suurima langu poole (madalaima väärtusega punkti suunas). Igale liikunud punktile omistatakse oma kindel värvus, mis sõltub liikumise suunast. Joonisel 2.5 on kujutatud Ilmatsalu jõgi, pärast nimetatud töövahendi kasutamist.



Joonis 2.5. Flow direction tulemus Ilmatsalu jõe algusest.

Peale punktide liikumise suuna määramist, leitakse punktide kogunemise suund. Töövahendiga „*Flow accumulation*“ arvutatakse kokku kogunenud veevoolupunktide massid. Veevoolupunktide mass sõltub kokku kogunenud punktide summast (Joonis 2.6). Suure veevoolu massiga asukohtadest kujunevadki hiljem välja jõgede asukohad. Väikeste väärtustega punktide järgi piiritletakse aga hiljem valgalade piirid.



Joonis 2.6. Voolusuuna ja voolupunktide massi kogunemise põhimõtteline skeem. Allikas: ArcGis desktop 9.3 Help (12.05.2017)

Metoodika kohaselt uuritakse jõgesid, mis on pikemad kui 25 km. Antud kriteeriumi seadmise aluseks oli Eesti suhteliselt tasane reljeef ja eeldus, et antud kriteeriumist väiksematel vooluveekogudel ei ole mõistlik hüdroenergiat toota. Seda arvestades pole vajadust koguda infot väiksemate jõgede, ojade ja kraavide kohta. Nimetatud ebavajaliku info eemaldamiseks kasutatakse „*Reclassify*“ töövahendit. Aluseks võetakse „*Flow accumulation*“ töövahendi veevoolumasside tulemused, millele määratakse väärtuste vahemikud, mille alusel saab vooluveekogusid klassifitseerida. Antud töös jagati voolu massid väärtused kahte klassi, mille eesmärk on kaotada ära madalamas klassis olevad punktid (väikesed kraavid ja ojad).

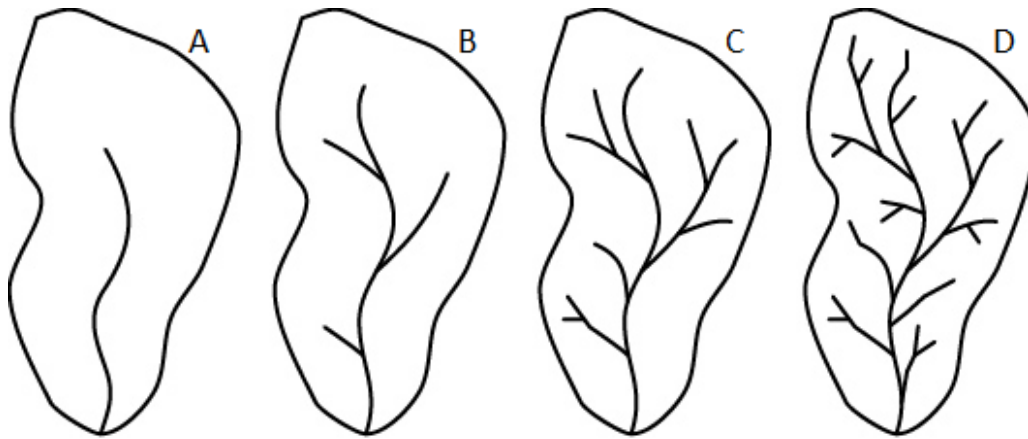
Selle jaoks katsetati erinevate väärtuste vahemikke. Miinimumiks valitud arv pidi olema piisavalt väike, et säiliks jõe tegelik pikkus (mida kontrolliti jõe ametlike andmetega), kuid samas piisavalt suur, et antud töös mittevajalikud kraavid ja ojad eemaldada. Mandri Eestis osutus sobivaks masside piirväärtuseks 30000 (Tabel 2.1). Antud töös nimetatud piirist madalamatele väärtustele määrati nimetuseks „*NoData*“ ehk andmed eemaldati edaspidisest analüüsist.

Tabel 2.1. Mandri vooluveekogude klassifitseerumine

Old values	New values
0 - 30000	NoData
30000 - 69095464	1
NoData	NoData

Kuna saartel on vooluvee massi tunduvalt vähem kui mandril, kasutati piirväärtusena mandri omast väiksemat väärtust. Saarte ainukesed piisava pikkusega jõed asuvad Saaremaal, milledeks on Lõve jõgi pikkusega 32 km ning Põduste jõgi pikkusega 31 km. Katse-eksitus meetodil saadi saartel voolluvee massi piirväärtuseks 5000, mis on mandrist kuus korda väiksem.

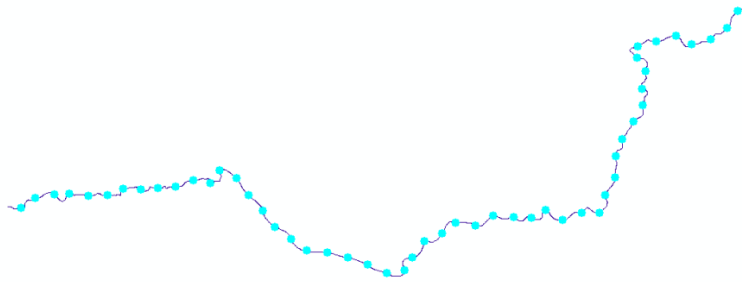
Joonisel 2.7 on näidatud erinevate piirväärtuste katestatamise põhimõtet. Skeemil A on piirväärtus valitud liiga kõrge, kuna kirjeldamata on jõe lähe. Skeemil B on valitud optimaalne piirväärtus, kus välja on joonestanud põhijõgi ja tema suurimad lisajõed koos lähtmetega. Skeemil C ja D valitud piirväärtus on valitud liiga madal ning kuvatud on üleliia mittevajalikku infot. Jõe valgala piiritlemisel arvestatakse kõigi lisajõgedega.



Joonis 2.7. Erinevad alamväärtused reclassify töövahendil. Allikas: ArcGis desktop 9.3 Help (12.05.2017)

2.3 Virtuaalsete HEJ loomine ja nende valgalade piiritlemine

Vastavalt töö metoodikale on vajalik jaotada uuritav jõgi võrdsete vahedega punktideks ehk virtuaalseteks HEJ (VHEJ) asukohtadeks. Seda tehakse töövahendiga „Construct points“. Antud töös koostatakse punktid iga 500 m tagant, mis edaspidi hakkavad tähistama VHEJ asukohtasid. Joonisel 2.8 on näide Velise jõe koostatud VHEJ asukohad.



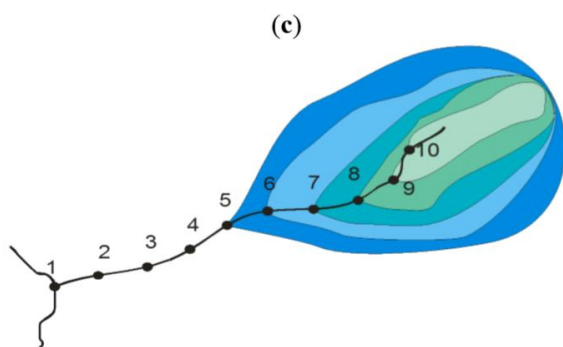
Joonis 2.8. VHEJ asukohad Velise jõel.

Valgala piirideks ehk veelahkmejoonteks on alad, kus vesi hakkab liikuma teise valgala suunas. Igal valgatal on punkt, kuhu selle ala vesi hakkab kokku jooksuma (joonis 2.9). Töövahend „Watershed“ määratleb ala, millelt kogunev vesi jookseb kokku otsitavasse punkti. Selle teeb töövahend kindlaks vooluvee liikumise suundade järgi. Töövahendi sisenditena kasutatakse „Flow direction“ tulemusi ning varasemalt genereeritud VHEJ asukohtade punkte.



Joonis 2.9. Valgala kujunemine. Allikas: ArcGis desktop 9.3 Help (12.05.2017)

Järgmise sammuna leitakse igale VHEJ vastav alam-valgala ja sellele vastav pindala (Joonis 2.10). Metoodika kohaselt pakuvad meile huvi VHEJ asukohad, kus on piisavalt suur vooluhulk ning piisavalt suur netorõhk. Valgala pindala kaudu on võimalik leida jõe igale VHEJ punktile vooluhulgad. Seega on oluline vaadelda valgalasid kasvavas järjekorras (jõe lähtmest suudme suunas. Iga punkti juures asuvale alam-valgalale liidetakse juurde eelmiste lõikude valgala pindalad.



Joonis 2.10. Alam-valgala kujunemine igas punktis. (Punys *et al.*, 2011)

2.4 Töörõhu H ja vooluhulga Q arvutus virtuaalsetele HEJ-le

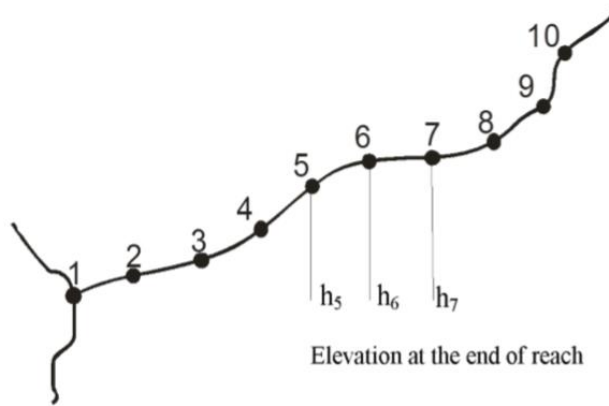
Lõikudeks jaotatud jõel arvutatakse igale VHEJ tema absoluutne kõrgus (Joonis 2.11). Absoluutne kõrgus omistatakse igale VHEJ-le kõrguskaardi pealt. Hüdroenergia arvutamise jaoks on vaja teada HEJ mõjuva veesamba kõrgust ehk tööõhku H . Selle leidmiseks kasutatakse valemit:

$$\Delta H = h_x - h_{x-1}, \quad (2.1.)$$

kus ΔH -Kõrguste erinevus m;

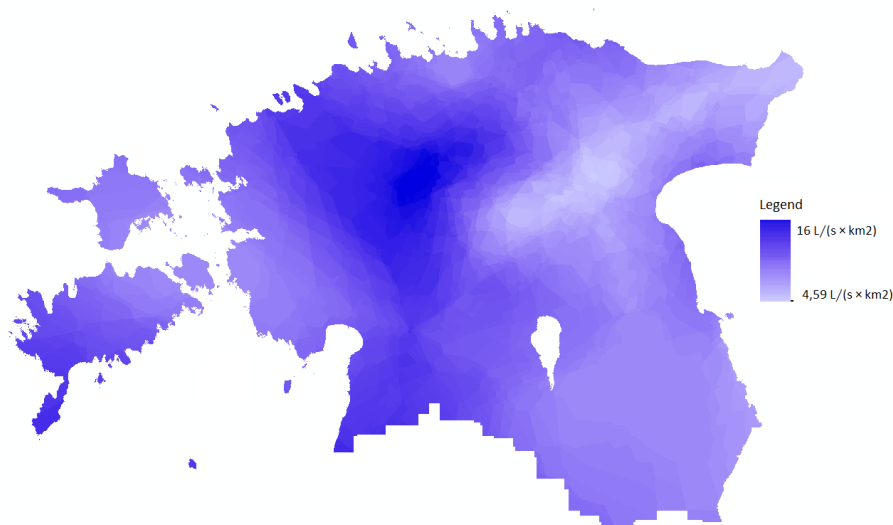
h_x -VHEJ absoluutne kõrgus m;

h_{x-1} -VHEJ absoluutne kõrgus järgmises punktis jõel voolamise suunas m.



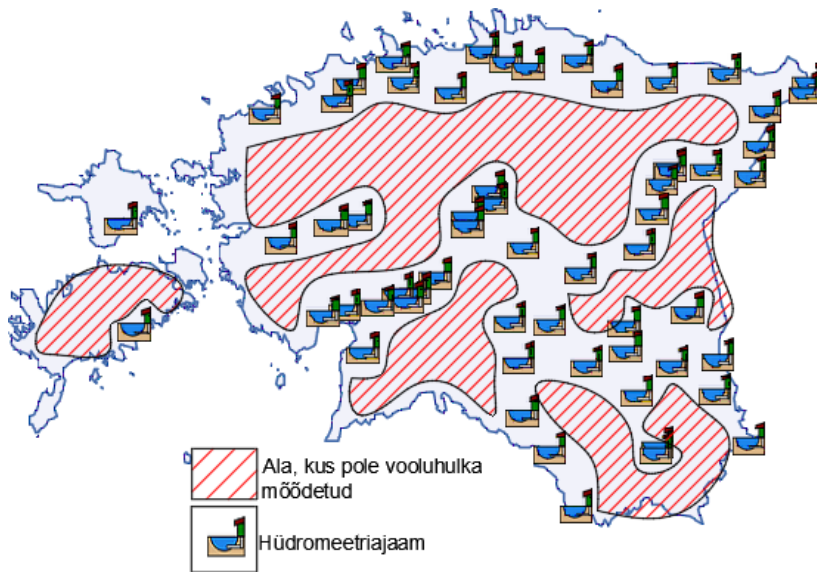
Joonis 2.11. Kõrguste leidmine igale punktile. Allikas (Punys *et al.*, 2011).

Vooluhulga määramiseks igale valgalale kasutatakse aasta keskmise äravoolumooduli kaarti. Iseloomulikud vooluhulgad VHEJ punktides on leitud hüdromeetria seirejaamade (HS) äravoolumoodulite kaudu (Joonis 2.12). Vooluhulga määramiseks kasutatud algandmed on saadud Eesti Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudist ja Keskkonnateabe keskusest.



Joonis 2.12. Äravoolumooduli aluskaart

HS vahele jäävatel aladel puuduvad väärtused interpoleeritakse lähedal asuvate jaamade andmetest (Joonis 2.13). ArcMap programmi lisatud äravoolumooduli aluskaartilt võetakse igale VHEJ äravoolumooduli väärtus. Väärtused on vahemikus 4,6-16 l/s*km². Äravoolumoodul on arvutatud vaatlusaastate keskmiste vooluhulkade järgi (Loigu, Reihan and Reinsalu, 2012).



Joonis 2.13. Hüdrometrijaamade jagunemine

VHEJ võimsuse arvutamise põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 2.14. Antud joonisel ei ole näidatud kasuteguri arvesse võtmist. Lõputöös määrati iga VHEJ konstantseks kasuteguriks 70%.

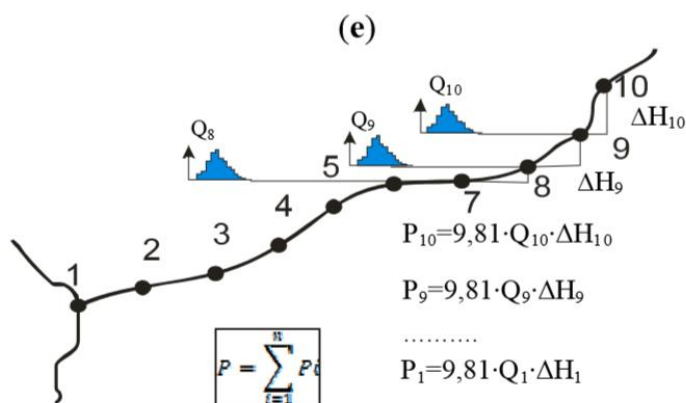
Iga VHEJ punkti arvutatakse vooluhulk kasutades järgmist valemit:

$$Q = (A \cdot q_x) / 1000000, \quad (2.2)$$

kus Q - Valgala äravool l/s;

A - Alam-valgala pindala m²;

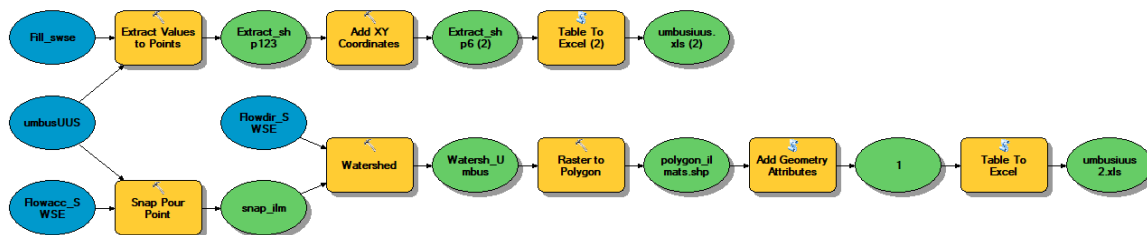
q_x - Aasta keskmine äravoolumoodul antud punktis l/s*km²



Joonis 2.14. VHEJ võimsuse arvutuse põhimõte.

2.5 Tegevuse automatiseerimine

Kuna vaadeldavaid jõgesid on kokku rohkem kui 100 ning iga jõe kohta tehtav protsess on sarnane, automatiseeriti eelpool nimetatud protsessid. Selleks kasutati ArgMap keskkonnas töövahendit „*Model Builder*“, millega seati paika töövahendite käivitamise järjekord, kus ühe protsessi väljund on teise protsessi sisend. Iga jõe kohta tuleb järjekord eraldi käivitada, kuna „*Construct points*“ töövahendiga koostatud punktide kiht on erinev. Joonisel 2.15 on kujutatud meetodika automatiseerimise plokkiskeem, kus kollase kastiga on näidatud töövahend (tegevus), roheline kast tähistab töövahendi tulemust (väljundit), mis enamjaolt on omakorda järgmise tegevuse sisend. Töövahendeid ja tulemusi saab teiste töövahenditega siduda nooltega, millega tekibki ülesannete jada. Antud töös koostatud jada algab punktikihist ning lõpeb punkte ja valgalasid iseloomustavate Exceli tabelite koostamisega.



Joonis 2.15. Automatiseerimise plokkiskeem

3. TULEMUSED

3.1 Metoodika efektiivsuse kontroll

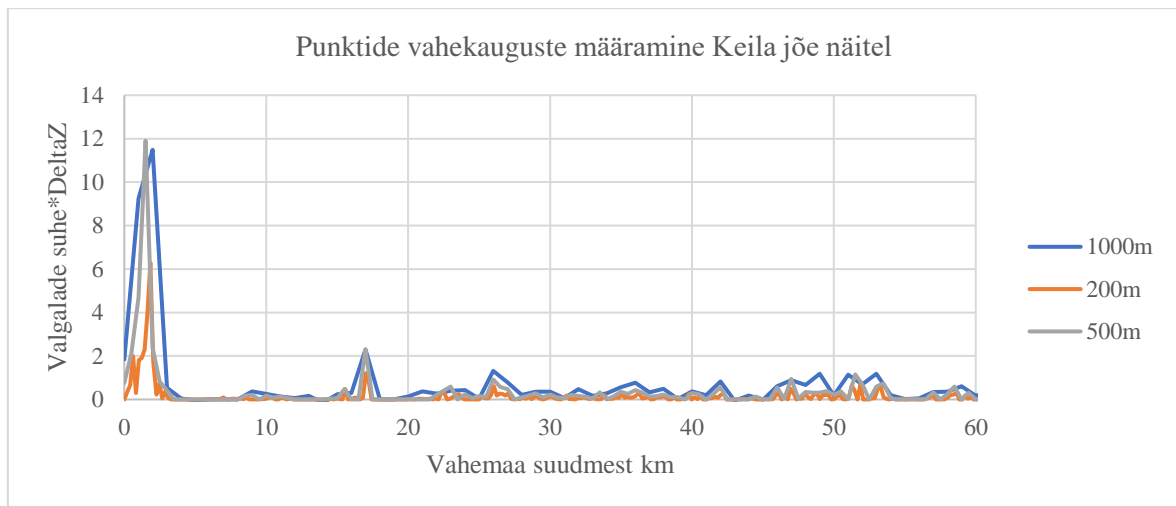
Metoodika efektiivsuse kontrolliks valiti Keila jõgi, mis voolab Rapla- ja Harjumaa territooriumil. Jõe pikkuseks on 111.8 km, koos lisaharudega 127.3 km ning valgala suurus on 669,3 km². Jõe keskmiseks languks on 0,65m/km. Suurim on lang alamjooksu viimasel viiel kilomeetril keskmiselt 4,46 m/km. Keila jõel paikneb Keila-Joa hüdroelektrijaam, mis asub suudmest 1,7 km kaugusel. Lisaks asub jõel veel seitse paisu: Kohila, Purila, Lohu, Mälivere, Uustalu, Inliste ja Keila-Joa pais.

3.1.1 VHEJ vahekauguste määramine

Metoodika kohaselt jaotatakse jõgi võrdseteks lõikudeks kindla distantsi järel, kuhu luuakse VHEJ-d. Seega esimeseks sammuks on VHEJ vahekauguste määramine. Esialgseks katsetamiseks sai valitud 200 m 500 m ja 1000 m pikkused vahekaugused. Katsetamise hetkel on valitud kõigi lõigupikkuste puhul 10x10 m resolutsiooniga kõrguskaart.

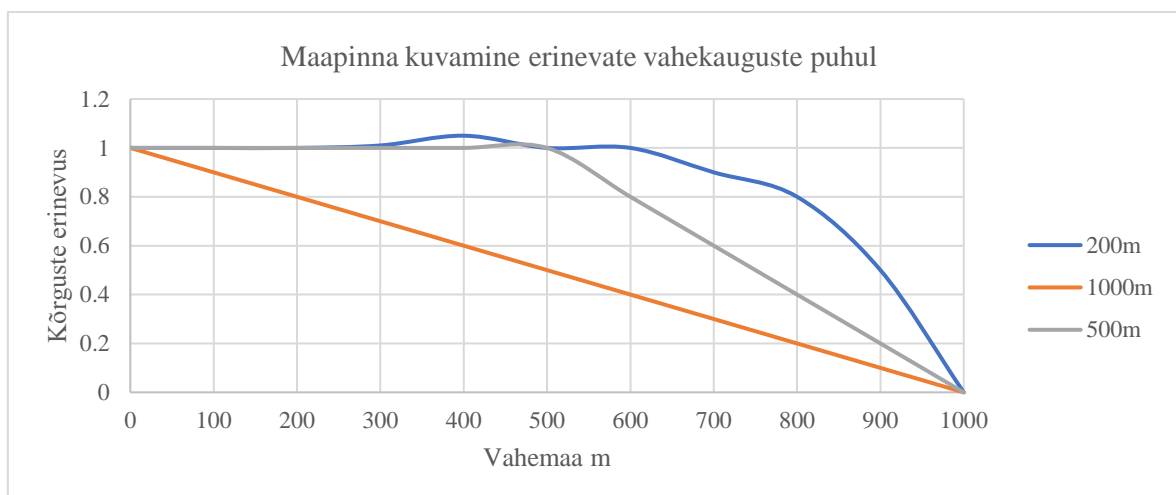
Vahekauguse mõju võrdlemiseks on kasutatud valgalade suhte ning kõrguste erinevuse (ΔZ) korrutist, millega on võimalik eristada suure hüdroenergeetilise potentsiaaliga asukohti. Võrdlemiseks koostati graafikud kolmest erinevast vahekaugusest. Joonisel 3.2 on näha, et Keila jõel 45-55 km vahepealsel osal ei eristu-kõrguste erinevused täpsemalt 500 m ja 200 m pikkuste lõikude puhul. Sellest võib järeldada, et kõige ebatäpsema tulemuse võib saada 1000 m vahekaugusega lõikude puhul. Lühemate vahemaade puhul tulemused erinevad vähesel määral.

Optimaalse HEJ asukoha valikul on olulise tähtsusega suurte kõrguserinevustega lõikude leidmine. Liiga pika lõigu puhul võib tekkida olukord, kus võib märkamata jääda mõni suurem veelang. Joonisel 3.1 on kujutatud olukorda kus, maapinna 1000 m vahekauguse kasutamisel on VHEJ vahel ühtlane lang, kuid lühemate distantside puhul on näha, et lang kujuneb teistsugusena.



Joonis 3.1. Punkti erineva vahekauguse mõju hindamine Keila jõel

Kogu Eesti hüdroenergeetilise potentsiaali arvutamise jaoks on piisav täpsus kõigil kolmel variandil. Töö lihtsuse säilitamiseks valiti 500 m pikkused vahekaugused, kuna sellisel juhul on andmeid millega hinnata optimaalseid HEJ asukohti vähem kui 200 m pikkuste lõikude puhul. Huvipakkuva jõe hilisemal analüüsimisel on võimalik koostada hiljem tihedama vahekaugustega punktid ning kontrollida saadud tulemusi.



Joonis 3.2. Punkti vahekauguste mõju hindamine tulemusele

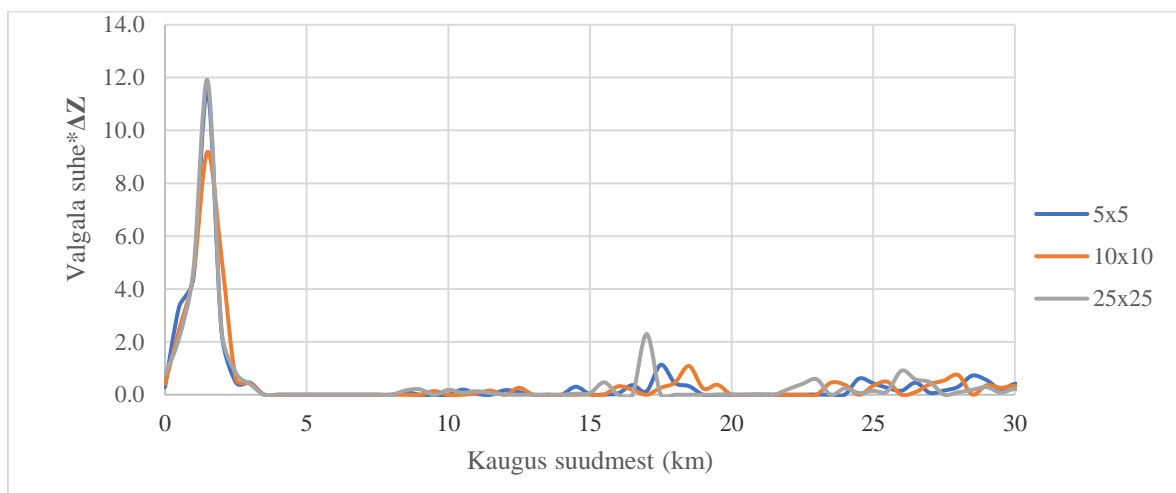
3.1.2 Kõrguskaardi resolutsiooni valik

Järgmise sammuna on vajalik välja selgitada sobiliku kõrguskaardi resolutsioon, mis oleks ühtlasti piisavalt täpne, samas jällegi vähe ressursinõudlik. Katsetamise käigus tehti läbi

metoodikale vastavad käigud Keila jõe ümbruse kõrguskaartidega, kasutades kolme erinevat resolutsiooni:

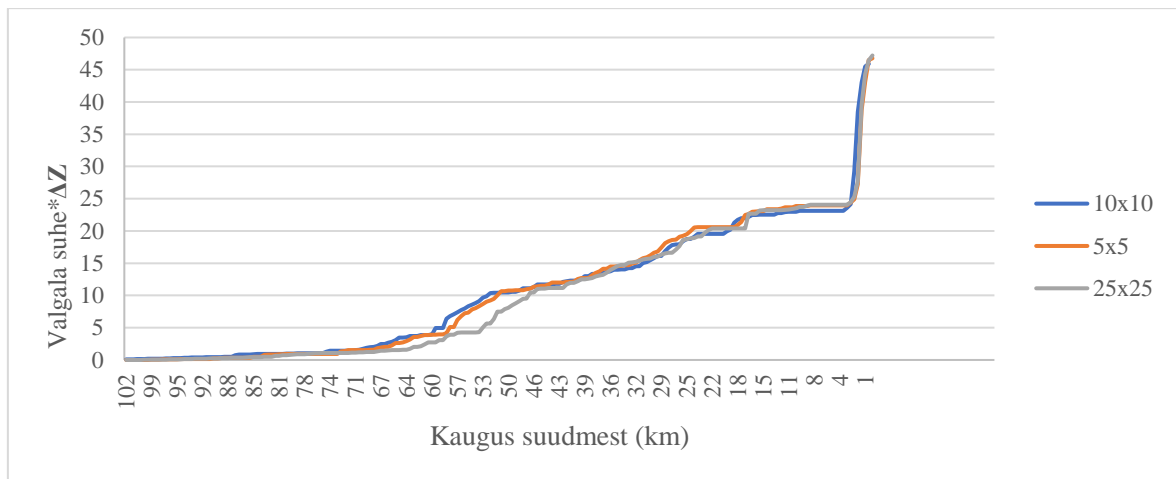
- 25x25 m
- 10x10 m
- 5x5 m

Tulemuse võrdlemiseks on kasutatud valgalade suhte ning kõrguserinevuste(ΔZ) korrutist. Kõigil kolmel resolutsiooniga kõrguskaardil on Keila jõgi jaotatud 500 m pikkusteks lõikudeks. Jõe suudmest 1,7 km kaugusel asuv tõus tuleneb sellest, et tegelikkuses asub antud asukohas 6.1 m langemisega Keila juga (Joonis 3.3). Järgmine suurem tõus tekib 17 km kaugusel suudmest.



Joonis 3.3. Tulemus Keila jõel

Resolutsiooniga 25x25 DEM-aluskaart otsustati mitte kasutusele võtta 46-58 km kaugusel suudmest tulenevast erinevusest võrreldes teiste resolutsioonidega kõrguskaartidega (joonis 3.4). Kuna 5 m ja 10 m resolutsiooniga DEM-kõrguskaartide erinevused olid minimaalsed, siis otsustati aja kokkuhoiu mõttes kasutada edaspidi 10x10m resolutsiooniga DEM-kõrguskaarte. Aja kokkuhoid tuleneb arvutuste hulgast, mida ArcMap programmis läbi viiakse. Katsetamise käigus kulus 5 meetrilise resolutsiooniga kõrguskaardil arvutuste tegemiseks märgatavalt rohkem aega kui 10 meetrilise resolutsiooniga kõrguskaarti kasutades.



Joonis 3.4. Kumulatiivne tulemus Keila jõel

3.2 VHEJ võimsuste võrdlemine Pärnu jõe näitel

Pärnu jõgi algab Roosna-Alliku alevikus ning suubub Pärnu lahte. Jõe pikkus on 144km, keskmine lang on 0,5 m/km s.o. 0,5 %. Jõe valgala on 6920 km². Suuremad lisajõed on Navesti pikkusega 100 km Halliste 86km , Reiu 73km ja Sauga 77 km. Pärnu jõe Oreküla hüdromeetria jaam asub jõe suudmest 25,7 kilomeetri kaugusel Oore külas. Vaatlusi on tehtud alates 1922. aastast. Jõe valgala Oreküla peelil on 5154 km² ja jõe vooluhulgad vaatlusperioodil 1922-1965 on aasta keskmine vooluhulk 370 m³/s ning 50% tõenäosusega tagatud vooluhulk 46 m³/s (Pärnu jõe põhiandmed, 2017).

Antud töö tulemuste põhjal on Pärnu jõe pikkuseks arvatud 143,5 km, mis erineb tegelikkusest alla ühe protsendi. Jõe absoluutseks kõrguseks jõe lähtel on 74,5 m, mis erineb tegelikkusest 0,7%. Keskmiseks languks teeb see 0,52 m/km, mis erineb 3,8% tegelikkusest. Jõe valgalaks on saadud ArcMap programmi kasutades 6306 km². Tegelikuses saadud pindala on leitud osaliselt 2008. ja 2009. aastal maaparandusbüroode poolt, nende puudumisel on kasutatud 1990.ndate lõpus koostatud valgalade kaardikihilt arvatud valgalade pindalasid. Aastal 1986. kasutatud nimestikus on märgitud valgala suuruseks 6920 km²(Pärnu jõe põhiandmed, 2017).

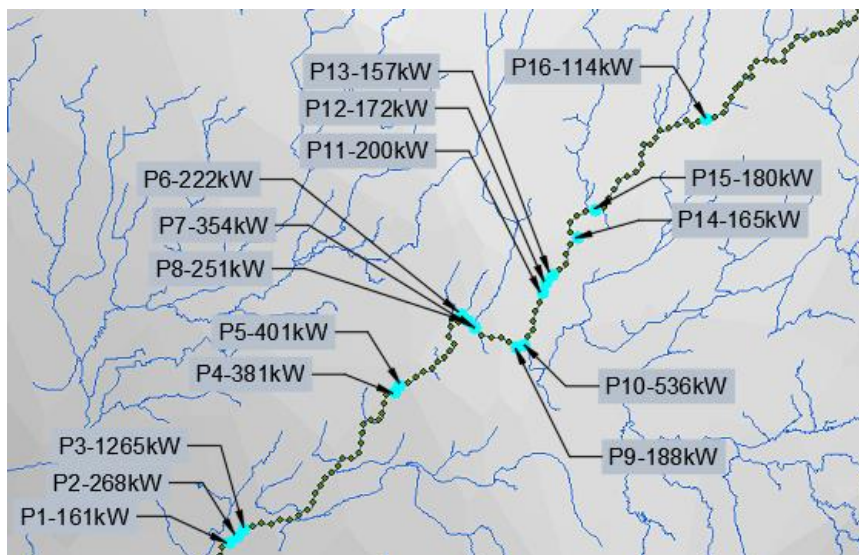
Saadud erinevuseks on 8,9% ning see võib tuleneda kõrguskaardil Fill töövahendiga lohkuide täitmisel tekkinud ebatäpsusest. Autori arvates on hüdroenergeetilise potentsiaali hindamise jaoks nimetatud täpsus aga piisav ja lõpptulemust oluliselt ei mõjuta.

Pärnu jõel tehakse hüdromeetria jaamades mõõtmisi Oore külas, Tahkusel ning Türi-Allikul.

Võrdlemiseks valitud periood on 1922-2016. Põhiline eesmärk oli võrrelda vooluhulkasid arvutustes saadud andmete põhjal ning võrrelda neid hüdromeetriaajas mõõdetud andmetega. Oore külas on Pärnu jõe vooluhulk keskmiselt $60,4 \text{ m}^3/\text{s}$ ning jõe valgala suurus on 5160 km^2 . Arvutustes saadud vooluhulk, kasutades äravoolumoodulit, on antud asukohas $60,41 \text{ m}^3/\text{s}$. Kuna erinevus on sisuliselt olematu, siis võib järeldada, et arvutused on piisava täpsusega. Arvutustes saadud valgala suurus on antud kohas 5122 km^2 ning erinevus tegelikkusega on ainult 0,7%. Antud tulemuste põhjal võib väita, et hüdroenergeetilise potentsiaali leidmise jaoks on täpsus tagatud.

Pärnu jõel suurima potentsiaalse võimsusega HEJ asukoht on 15 km kaugusel suudmest asuv lõik (P1), kus potentsiaalseks võimsuseks on 1265 kW (joonis 3.5). See on ka terve Pärnu jõe kõige suurema tööõhuga lõik. Tegelikuses asub selles asukohas Sindi pais. Sindis ehitati kalevivabrik 1832. aastal, kaks aastat hiljem valmis ka pais. Seda on ligi kaheksa aasta jooksul mitu korda ümber ehitatud. Pais sai oma praeguse kuju 1977. aastal ning kõrguseks on 4,3 m. Pais asub Natura 2000 nimekirja kuuluval Pärnu jõe loodusalaal jõelõigul (Koppel, 2018).

Kokku on Pärnu jõel 26 asukohta, kus VHEJ potentsiaalne võimsus on üle 100kW. Nendest 11 kohas on võimsus vähemalt 200 kW. Kogu jõepeale kokku on potentsiaalne võimsus 10,8 MW, mis teeb kogu Eesti potentsiaalsest võimsusest 14,4%. Tänapäeval pole Pärnu jõel ühtegi töötavat hüdroelektrijaama.



Joonis 3.5. Suurimate potentsiaalsete võimsustega punktid Pärnu jõel.

3.3 VHEJ võimsuste võrdlemine Keila jõe näitel

Keila jõel on hüdromeetrija jaamas kogutud andmeid juba aastast 1923. Jaam on ehitatud jõe suudmest 19 km kaugusele Keila linna. Jaam asub mere pinnast 24 m kõrgusel ning selles kohas loetakse jõe valgala 635 km² suuruseks. Alates 2007 aastast on jaamas mõõtmine automatiseeritud. Mõõtmisi tehakse enne Keila-Joa hüdroelektrijaama (Keila hüdromeetrijaam, 2017).

Antud töös kasutatakse andmeid, mis on mõõdetud vaatlusperioodil 1953-2000. Kuna Keila jõe ümbruses koostatud äravoolumooduli kaart on koostatud sama vaatlusperioodi kohta, siis on korrektsem võrrelda programmist saadud andmeid sama perioodiga.

Hüdromeetria jaamast saadud andmete põhjal on keskmine vooluhulk aastatel 1953-2000 Keila jõel 13,54 m³/s (Keila hüdromeetrijaam, 2017). Arvutustest saadud andmetest selgus, et 19 km kaugusel olevas punktis on äravoolumooduli kaudu leitud vooluhulgaks 8,17 m³/s. Jõe pikkuseks on 112 km ning koos lisaharudega 127.3 km. Antud töö tulemuste põhjal on jõe pikkuseks 102 km, mis erineb tegelikkusest 8,8%. Antud töö metoodika kohaselt selekteeriti jõed ühe kaupa, ning sellega seoses võivad jõgede pikkused erineda tegelikkusest. Kuna jõe lähtel on reeglina vett vähe ning valgala suurus suhteliselt väike, siis erinevused mõjutavad lõpptulemust väga vähesel määral.

Valgala suuruseks loetakse 669.3 km². ArcMAP'is saadud valgala suurus koos lisajõgedega on 685 km², mis erineb tegelikkusest 2.2%.

Täpsema võrdluse saamiseks võrreldakse omavahel hüdromeetrija jaama andmeid ArcMapist saadud andmetega. Selle jaoks on vaja teada jaama kaugust suudmest ning see punkt võetakse ka arvutustel aluseks.

Valitud hüdromeetrija jaama asukohas on valgala suuruseks saadud kokku 585 km². Võrreldes Riigi ilmateenistuse lehelt saadud andmetega on see 7,9% väiksem pindala. ArcMap'is saadud andmete põhjal on jõe keskmiseks languks 0,7 m/km. Tegelikkuses loetakse Keila jõe keskmiseks languks 0,65 m/km (Järvekülg 2001: 501). See teeb tulemuste erinevuseks 7%.

Erinevus mõõdetud kõrguse ning arvutustes saadud kõrguste vahel võib tekkida jõe veepinna kõrguse muutustest. DEM kõrguskaardi koostamise hetkel oli jõe tasapind madalam, kui ta on reaalselt registreeritud andmebaasides. Samuti võib arvestada, et ArcMap on kõrguskaartide töötlemisel teinud interpoleerimisi ja ümardamisi, mille tõttu võib tulemus pisut muutuda. Hüdroenergeetilise potentsiaali hindamise jaoks on see täpsus aga täiesti

piisav. Seda kontrollitakse arvutuste teel saadud võimsuse ning tegelikkuses asuva HEJ võimsusega võrreldes.

Keila jõel asuval Eesti Energia AS-le kuuluvast Keila-Joa hüdroelektrijaamas on töörohke 8,7 m. Hüdroelektrijaamas on üks asünkroon-generaator ja üks reguleeritavate töö- ja juhtlabadega kaplan-tüüpi 1 meetrise läbimõõduga ja 5,5 m³/s nimivooluhulgaga turbiin. Jaama võimsuseks on 365 kW ja keskmine aastatoodang ulatub umbes 2,5 GWh. Vee erikasutusloas sätestatud piirangu järgi ajavahemikul 1. maist kuni 1. septembrini, laupäevadel ja pühapäevadel ning riiklikel pühadel jõe vooluhulga korral alla 10 m³/s, tuleb vahemikus 12.00-20.00 kogu vooluhulk suunata Keila joale. Hüdroelektrijaam asub Keila jõe kõrval, 1,7 km kaugusel suudmest (Keila-Joa hüdroelektrijaam, 2017).

Vastavalt vee erikasutusloale peab paisust vahetult allpool olevas jõelõiguses olema pidevalt tagatud ökoloogiline miinimumvooluhulk 0,62 m³/s. Turbiin hakkab tööle, kui jõge läbiv vooluhulk ületab sanitaar vooluhulka ja turbiini jaoks vajalikku 20 % täiskoormust. Seega peab hüdroenergia tootmiseks olema vooluhulk jões vähemalt 1,10 + 0,62 = 1,72 m³/s. Turbiin töötab täie võimsusega, kui vooluhulk jões on 5,5 + 0,62 = 6,12 m³/s. Kui jõest tulev vooluhulk on suurem, kui turbiini maksimaalne võimsus, juhitakse ülejäänud vooluhulk turbiinist ja derivatsioonikanalist mööda (Soomets, 2017).

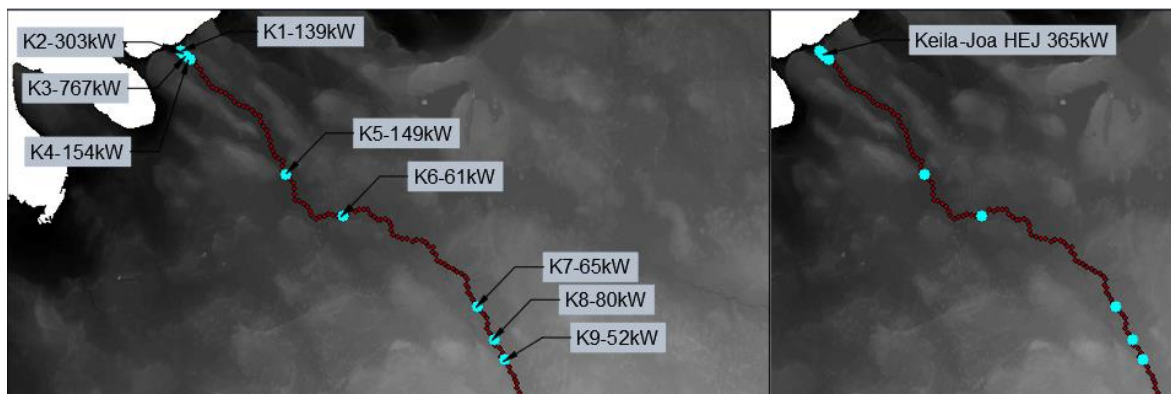
Arvutustega saadud andmete põhjal kerkis esile 6 asukohta, mis nõuaks rohkemat uurimist. Esimene neist asub 1,5 km kaugusel suudmest (Joonis 3.6). Kuna punktide samm on 500 m siis võib arvestada, et selles asukohas asub tegelikkuses Keila jõe hüdroelektrijaam.

Antud asukohas mudeli järgi saadi tulemuseks 11,95 m suurune kõrguste erinevus ning 9,35 m³/s vooluhulk. Kasutades hüdroenergia arvutamise valemit (Valem 1.3) saab välja arvutada teoreetilise võimsuse selles asukohas.

Teoreetiliselt keskmise vooluhulga korral oleks võimsuseks jaamal 767 kW. Hüdroelektrijaama modelleerimisel peab aga arvestama, et antud kohas pole alati garanteeritud 9,35 m³/s vooluhulk. Suveperioodi madalaim kuu keskmine vooluhulk leiab aset juulis, mil kuu keskmine vooluhulk on 2,4 m³/s, olles aasta keskmisest 3,9 m³/s väiksem (Soomets, 2017).

Et oleks tagatud jaama aastaringne toimimine, siis on mõistlikum rajada väiksem jaam, et garanteerida suure tõenäosusega kohalikule koormusele vastav võimsus. ArcMap'i järgi on Keila-Joa hüdroelektrijaama asukohas potentsiaalset energiat rohkem kui seda tänasel päeval kasutatakse. Arvutustes selgus, et 2 km pikkuse lõigu jooksul on hüdroenergeetilist võimsust kokku 1363kW.

Antud töös ei arvestata aastase keskmise toodangu juures vee erikasutusloast sätestatud piiranguid. Töö eesmärk on leida teoreetiliselt hea asukoht energia tootmiseks ning umbkaudselt hinnata toodetava võimsuse suurusjärku. Seda arvesse võttes saab esialgse hinnangu sellel jõel anda piisava täpsusega. Huvipakkuvatest asukohtadest on võimalik teha edaspidi uuringuid, millega on võimalik määrata täpsem energiatootmine.



Joonis 3.6. Keila jõe hüdroelektrijaamade potentsiaalsed asukohad ning Keila-Joa HEJ asukoht tegelikkuses.

Järgmine huvipakkuv koht asub umbes 17 km kaugusel suudmest. Mudeli järgi tekib selles kohas 2,45 m suurune kõrguseerinevus. Hüdroenergia võimsus selles kohas oleks 149 kW. Viimased kolm asukohta tekivad seoses Kohila, Lohu ning Mälivere paisudega. Paisutusega tekivad umbes 2 m kõrgused langemised. Lohu paisus on lang 2,2 m, ning seoses sellega ka 80 kW'ine hüdroenergeetiline võimsus.

3.4 VHEJ võimsuste võrdlemine Võhandu jõe näitel

Võhandu jõgi on Eesti pikim jõgi pikkusega 162 km. Paikneb Kagu-Eestis Põlva ja Võru maakonnas ning omab arvukalt lisajõgesid. Algab Saverna külast 0,5 km edela pool ja suubub Lämmijärve. Jõe valgala suuruseks on 1420 km².

Veepinna absoluutne kõrgus on lähtel 132,5 m ja suudmes 30,1 m. Seega teeb see jõe languks 102,4 m. Lang on suurim keskjooksul Koolma ja Haavapää vahelises 12 km pikkuses lõigus - keskmiselt 1,72 m/km.

Võhandu jõe keskjooksu ürgorg on võrdlemisi kitsas (150-200 m), kõrgete (enamasti 15-20 m) ja järskude veerudega, arvukate kaunite Devoni liivakivi paljanditega (müüridega) ja

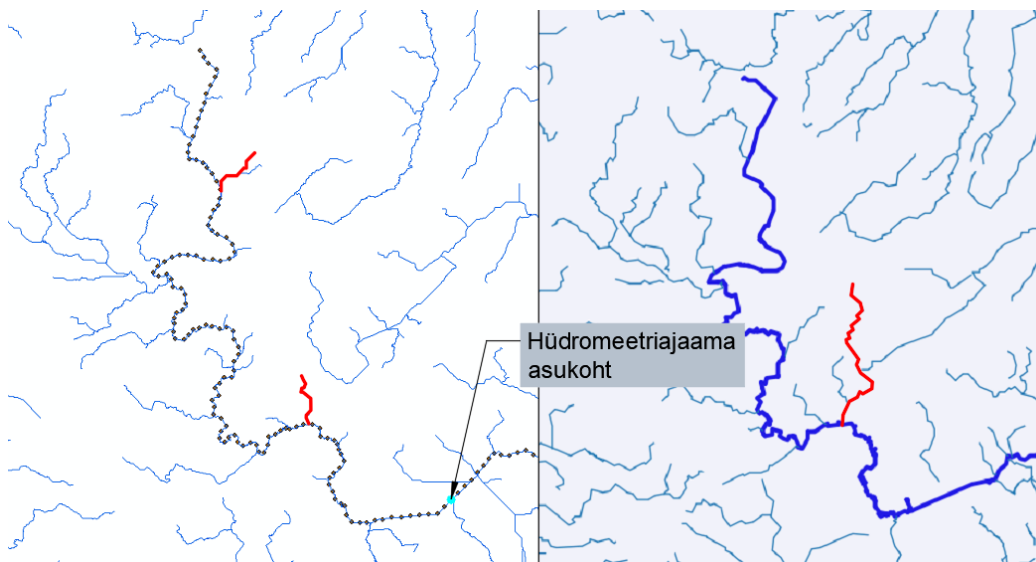
rohkete allikatega. Leevi sillast kuni Reo sillani (12 km pikkuselt) on org võetud looduskaitse alla.

Võhandu jõel oli varasematel aegadel palju vesiveskeid. Näiteks 1937. a. oli vesiveskeid jõe algusosas Alaküla ojal, Pühajõe osas 10 ja Suur-Võhandul 10. Lisaks oli elektrijaama pais Rāpinas. Praegu töötavad neist veel vähesed ja rajatud on hüdroelektrijaam Leevakule (A. Järvekülg. Eesti jõed. Tartu, 2001).

Võhandu jõel koosneb vaatlusvõrk kahest hüdrometrijaamast. Kirumpää hüdrometrijaam asub Võru maakonnas Kirumpää külas. Jaam ise on avatud alles 2010 aastast ning on algusest saati olnud automatiseeritud mõõtmisega. Jaam asub 88.7km kaugusel suudmest ning selles kohas loetakse valgala suurusks 576 km². Jaam asub 68,15 m kõrgusel merepinnast (Kirumpää hüdrometrijaam, 2016).

Arvutuste järgi on absoluutne kõrgus veepinnast selles kohas 70,48 m ehk erinevus on ca 2,3 m või 3,4%. Saadud valgala suurus antud kohas on 401 km² ning seega on erinevus 30%. Kirumpää hüdrometrijaam asub Võhandu jõel üsna ülemjooksul, kus on palju väikeseid lisajõgesid. Kohati voolavad väikesed jõed ArcMAPis erinevalt tegelikkusest. Kuna langud ja alad on väikesed ning igasugune tarkvara poolt tehtud korrektuur kõrguskaardil võib jõe suunata kokku hoopis teise kõrvaloleva jõega. Nii on ka näha joonisel 3.7, kus vasakul on pilt tehtud ArcMAP programmis ning parempoolne pilt on võetud Ilmateenistuse Interaktiivnselt veeseire kaardilt. Punasega märgitud lisajõed erinevad omavahel, tänu sellele on ka valgala erinevad ning sellega võib mõnel jõel tekkida ka umbes 30% erinevus andmetes. Selline olukord aga juhtub ainult jõe ülemjooksul. Jõe keskosades ja suudmetes on jõgede poolt uuristatud madalamad kohad selgelt eristuvad ning jõgede kulgemine on väga täpne.

Kuna vaadeldavaid andmeid on kogutud alles 2010. aastast, siis täpse tulemuse saamiseks ei saa võrrelda tegelikke vooluhulkasid arvutustes saadud vooluhulkadega. Arvutustes kasutatav vooluhulk on koostatud äravoolumooduli kaarti kasutades, kus andmeid on kogutud aastatel 1959-2000. Seega on õigem võrrelda arvutustes saadud vooluhulkasid Rāpina hüdrometrijaamas mõõdetud andmetega.



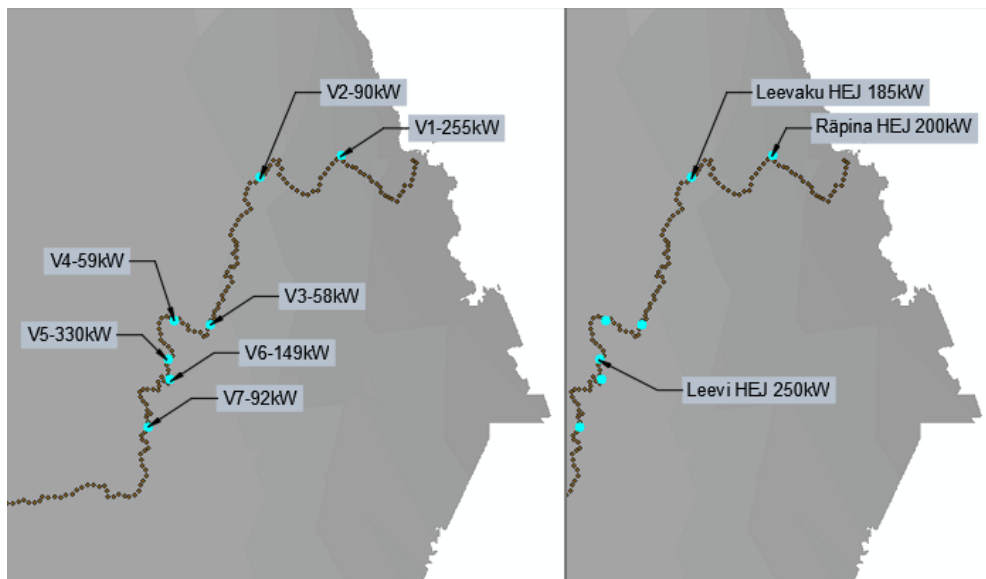
Joonis 3.7. Võhandu lisajõgede võrdlus Ilmateenistuse rakenduses (vasakul) ning ArcMap programmis (paremal).

Räpina hüdromeetriaajaam asub Räpina linnas ning see on jõe suudmest 11.8 km kaugusel. Jaam on avatud 1924 aastast ning alates 2007 aastast on mõõtmised automatiseeritud. Jaama graafiku null asub 30.77 m kõrgusel merepinnast ning sinna kogunev valgala on 1130 km² suurune (Räpina hüdromeetriaajaam, 2016).

Hüdromeetria jaamas kogutud andmete järgi on keskmine vooluhulk perioodil 1959-2000 13,7 m³/s. Arvutustes saadud tulemuste põhjal on saadud Võhandu jõel vooluhulgaks 11,2 m³/s. Erinevus saadud andmete vahel on 37,6%.

Valgala suurus antud kohas on ArcMap'i järgi 1075 km², mis erineb tegelikkusest vaid 4,9%. Võib järeldada, et antud näitel ei teki erinevus vooluhulgas valgalade suurusest, vaid erinevus tekib äravoolumooduli väärtuste tõttu. Kuna Võhandu jõgi on Eesti kõige pikem jõgi, siis paratamatult läbib jõgi mitmeid erinevaid alasid, kus äravoolumoodul muutub. Sellega seoses on raske seada paika täpset äravoolumoodulit igas punktis.

Arvutustes kerkis esile seitse asukohta, kus potentsiaalne hüdroenergia võimsus on suurem kui 50 kW. Kolmes asukohas on hüdroenergeetiline võimsus suurem kui 100 kW (Joonis 3.8). Hetke seisuga asub Võhandu jõel kolm hüdroelektrijaama.



Joonis 3.8. Potentsiaalsete hüdroelektrijaamade asukohad Võhandu jõel ning hüdroelektrijaamade asukohad tegelikkuses.

Võhandu jõgi on Eesti pikim jõgi ning seega on hea analüüsida, kui korrektsed tulemused saab antud metoodikaga suure koguse VHEJ arvutustega. Antud jõel leiti seitse asukohta, mida on analüüsitud.

1. Esimene punkt asub 12 km kaugusel suudmest. Tegelikkuses asub antud asukohas Rõpina paberivabriku hüdroelektrijaam võimsusega 75 kW. Kavandatakse 200 kW võimsusega jaama (Hüdroelektrijaam, 2016). Mudeli järgi on selles asukohas potentsiaalne võimsus 255 kW.
2. Teine punkt asub suudmest 23 km kaugusel ning tegelikkuses on selles asukohas Leevaku hüdroelektrijaam. Jaam on taastatud 1993. aastal ning praeguseks on jaama võimsus 185 kW (Leevaku hüdroelektrijaam, 2017). Arvutuste järgi on antud asukoha hüdroenergeetiliseks võimsuseks 90 kW.
3. Asukohas ei asu hetkel midagi inimtekkelist. Potentsiaalne võimsus on antud asukohas 58 kW.
4. Punkt asub suudmest 47 km kaugusel ning tegelikkuses asub selles kohas pais. Mudeli järgi on tööõhuks 1.2 m ning potentsiaalne võimsus 59 kW.
5. Punktis asub tegelikkuses Leevi hüdroelektrijaam. Jaama võimsus on 250 kW. Arvutuste järgi on jaama võimsuseks 330 kW.
6. Antud asukohas ei asu hetkel midagi inimtekkelist. Potentsiaalne võimsus selles asukohas on 149 kW

7. Antud asukohas ei asu hetkel midagi inimtekkelist. Potentsiaalne võimsus selles asukohas on 92 kW

3.5 VHEJ võimsuste võrdlemine Jägala jõe näitel

Jägala jõgi on üks suurimaid jõgesid Soome lahe vesikonnas. Jõgi algab Ahula külast ja suubub Ihasalu lahte. Jõe pikkuseks loetakse 97 km ning valgala suuruseks 1570 km². Jõe veepinna absoluutne kõrgus lähtel on 82 m, suudmes 0, mis teeb keskmiseks languks 0,84 m/km. Lang on suurim alamjooksul, kus jõgi läbib Põhja-Eesti paekalda. 4,3 km kaugusel suudmest asub 8 m kõrgune Jägala juga. Jõe kesk- ja alamjooksul on mitu paisu, neist kõrgeim Linnamäe HEJ pais paikneb jõe suudmest 1,3 km kaugusel kõrgusega 11 m. 1975. a alates on Jägala jõgi lülitatud Tallinna veevarustuse süsteemi (A. Järvekülg. Eesti jõed. Tartu, 2001).

Jägala jõel tehakse mõõtmisi vaid ühes hüdromeetriaajas. See asub 25,9 km kaugusel jõe suudmest Ülejõe külas. Valgala pindala jaama asukohas on 903 km² ning absoluutne kõrgus on 40,34 m.

ArcMap'ist saadud andmetel on antud asukohas valgala suuruseks 992 km², mis erineb tegelikkusest 9,8%. Absoluutne kõrgus antud punktis on 41,05 m. Sarnaselt Võhandu jõega, läbib ka Jägala juga alasid, kus pole vooluhulga mõõtmisi tehtud. Seega sõltub ka selle jõe vooluhulk äravoolumoodulis leitud tulemustest (Joonis 3.9). Aastatel 1982-2000 on jõe keskmine vooluhulk Kehra hüdromeetriaajas olnud 14,24 m³/s. Mudel andis väärtuseks samas asukohas 12 m³/s, mis erineb tegelikkusest vaid 15,7%. Võib järeldada, et antud arvutustes saadud tulemused on piisava täpsusega.



Joonis 3.9. Jägala jõe paiknemine hüdromeetrijajaamade suhtes.

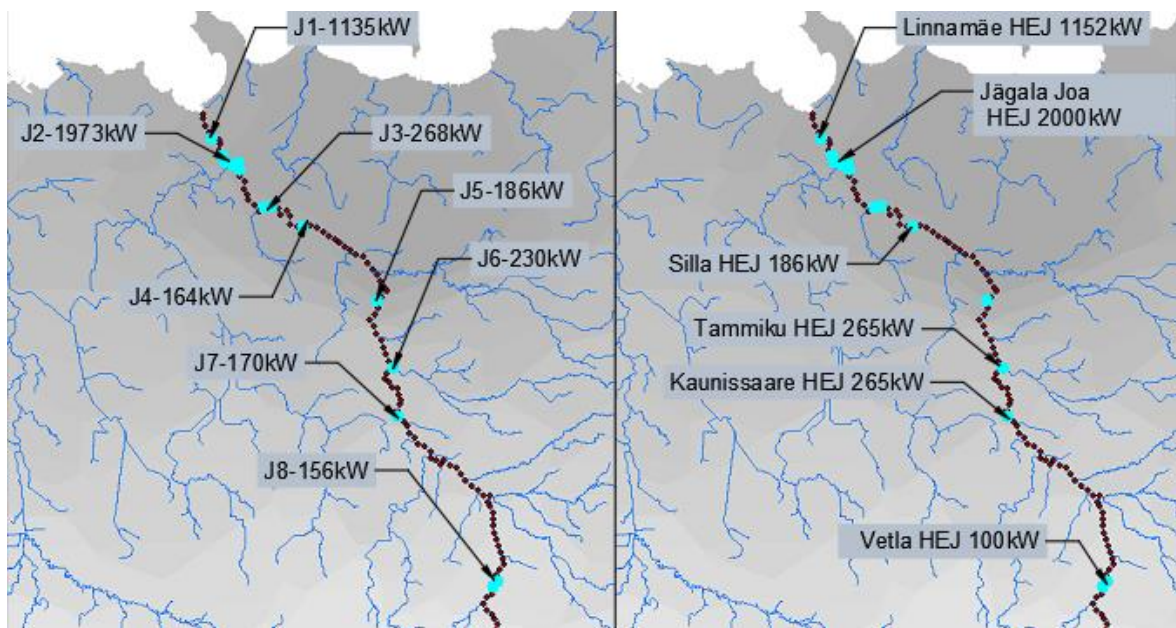
Jägala jõel asub suurim HEJ ning seega on hea analüüsida antud metoodika hüdroenergia arvutamise täpsust suurte võimsuste juures. Jägala jõel leiti 8 kohta kus oleks võimalik hüdroenergiat suurtes kogustes toota (joonis 3.10).

1. Asub umbes 2 km kaugusel jõe suudmest. Arvutuste tulemusel selgus, et antud asukohas on hüdroenergeetiline võimsus 1135 kW. Tegelikuses asub antud asukohas 10 m netorõhuga Linnamäe hüdroelektrijaam võimsusega 1152 kW. Eesti Energiale kuuluv Linnamäe hüdroelektrijaam on Eesti suurim hüdroelektrijaam, mille maksimaalne elektrienergia toodang on 7 GWh aastas.
Jaamas asub 3 propellerturbiini mittereguleeritavate labadega. Turbiinide nimivooluhulk kokku on 13,5 m³/s. Arvutustes saadud tulemuse järgi on selles asukohas vooluhulk 17 m³/s.
2. Järgmisena kerkis esile umbes 1,5 km pikkune lõik, kus arvutuste järgi on kokku langu 16,3 m. Antud asukoht asub suudmest umbes 5 km kaugusel, kus tegelikuses läbib jõgi Põhja-Eesti paekallast. See on Jägala jõe kõige suurema languga lõik. Samuti asub sellel ala sees 8 m kõrgune Jägala juga. Tegelikuses on sinna rajatud 850 m pikkuse derivatsioonikanaliga Jägala Joa hüdroelektrijaam võimsusega 2000

kW. Osa vett juhitakse Jägala joast kõrvalt mööda ning siis lastakse kukkuda läbi turbiinide.

Arvutustes saadud andmete puhul oleks selle lõigu potentsiaalne võimsus 1973 kW.

3. Umbes 10 km kaugusel suudmest on järgmine pais. Mudeli järgi on sellel lõigul langu 2,73 m/km ning teoreetiliseks võimsuseks on 268 kW.
4. Umbes 14 km kaugusel suudmest näitab mudel 1,7 m suurust langu. Potentsiaalseks võimsuseks on antud kohas 164 kW. Tegelikuses asub selles asukohas pais koos Silla hüdroelektrijaamaga.
5. Umbes 23 km kaugusel asub järjekordne pais. Arvutuste järgi on lang antud asukohas 2.2 m ning potentsiaalne võimsus 186 kW.
6. Umbes 28 km kaugusel lähtest asub Tammiku hüdroelektrijaam võimsusega 50 kW. Arvutustes saadud võimsus antud asukohas on 230 kW.
7. 35 km kaugusel suudmest asub Kaunissaare hüdroelektrijaam võimsusega 265 kW. Arvutustes saadi antud asukohas võimsuseks 170 kW.
8. Arvutuste järgi on antud asukohas võimsus 156 kW. Tegelikuses asub selles kohas Vetla vesiveski. Vetla vesiveskis jahvatati vanasti jahu ja saeti laudu. Hüdroelektrijaam hakkas tegutsema 2003. aasta märtsis. Kuid 2009. aastal ei jõutud naabritega veepiiri nihutamises kokkuleppele ning tootmine lõpetati. Vetla hüdroelektrijaamas oli kaks 50 kW turbiini.



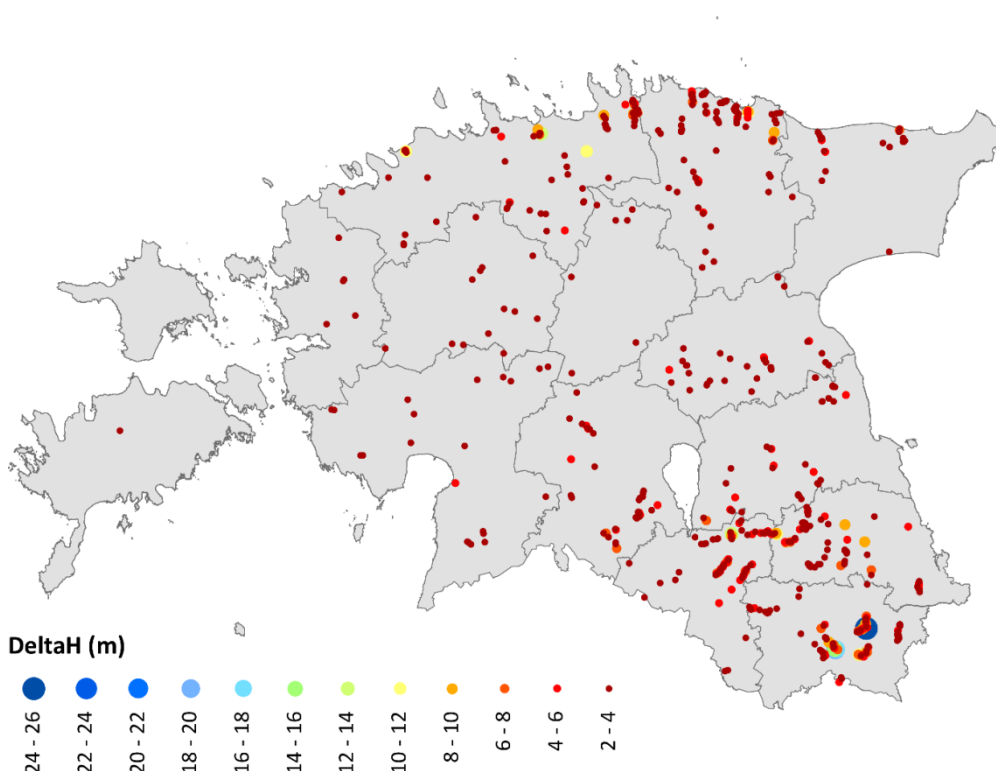
Joonis 3.10. Jägala jõe potentsiaalsed asukohad hüdroenergia tootmiseks ning tegelikud HEJ asukohad koos võimsustega.

Üle 50 kW hüdroenergeetilise võimsusega asukohti on Jägala jõel veel 7 kohas. Jägala jõe puhul võib järeldada, et optimaalsete HEJ asukohtade leidmisel ning võimsuse suurusjärgu hindamisel on metoodika piisavalt täpne.

3.6 Hüdroenergeetiline potentsiaal Eestis

Vaatamata sellele, et Eesti on tasase pinnamoega, esineb siinsetel jõgedel hulgaliselt suure languga asukohtasid. Kõrgusvahesid iseloomustavat kaarti analüüsides võib väita, et kõige paremad asukohad HEJ rajamiseks võiks olla Põhja-Eesti rannikul ning Lõuna-Eesti maakondades (Joonis 3.11). Kogu Lääne-Eesti piirkond on tasase pinnamoega ning ainult mõnes üksikus kohas tekib kuni 4 meetrise kõrgusvahega punkte.

Analüüsides potentsiaalsete hüdroelektrijaamade asukohti, selgub hoopiski, et üheks suurima hüdroenergia potentsiaaliga asukohaks osutub tasase pinnamoega Pärnumaa, kus voolab suure vooluhulgaga Pärnu jõgi (Joonis 3.12). Suurte kõrgusvahedega Lõuna-Eesti piirkond on veevaeste jõgedega ning hüdroenergiat suurtes mahtudes toota ei ole võimalik. Kõige suurema hüdroenergeetilise potentsiaaliga maakonnaks osutus Harjumaa, kus on olemas võimsate vooluhulkadega jõed, ning jõgede suudmetes suured kõrgusvahed.



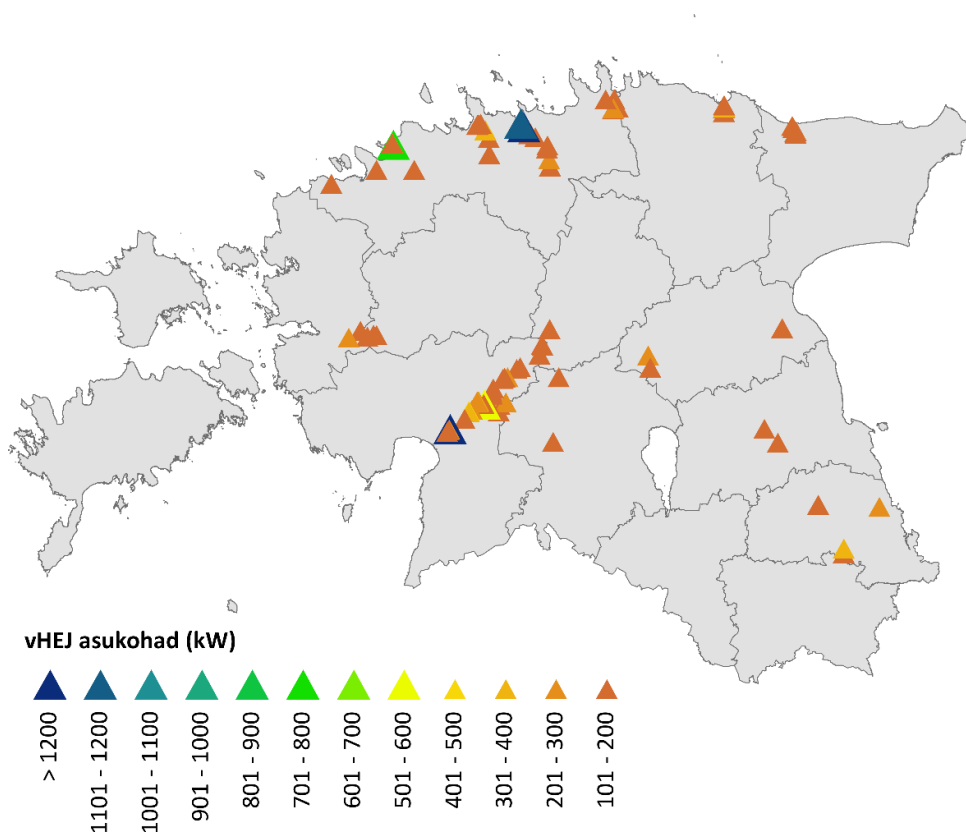
Joonis 3.11. DeltaH iseloomustav kaart

Kokku koguti andmeid 115 jõel mandri Eestis ning 2 jõe kohta Saaremaal. Arvutustes selgus, et Eestis on kokku 93 erinevat asukohta, kus hüdroenergeetiline võimsus on vähemalt 100 kW. Sellest 27 asukohas on võimsus vähemalt 200 kW (Tabel 3.2).

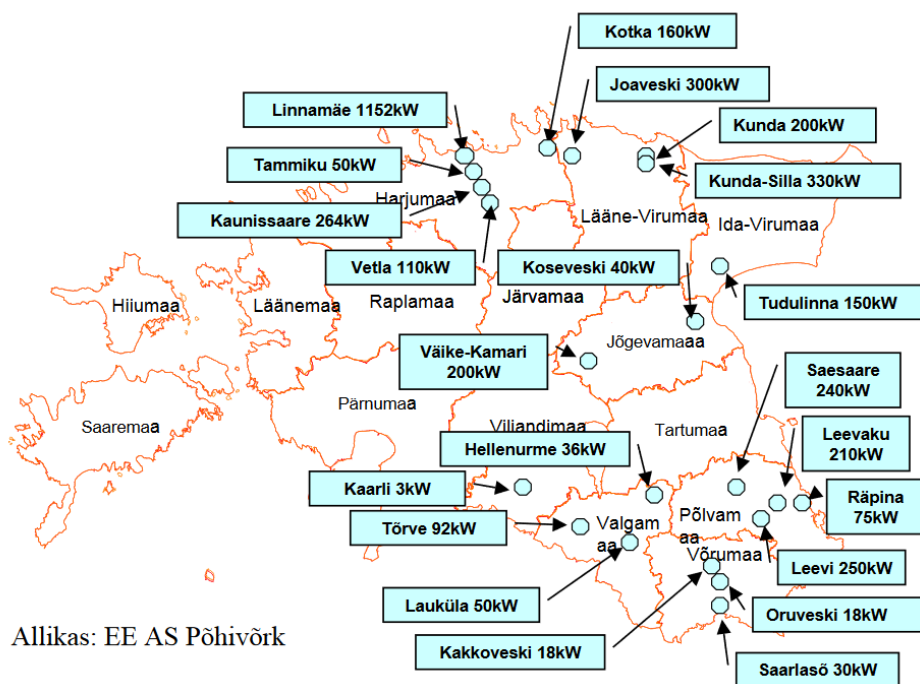
Tabel 3.2. Potentsiaalsete HEJ kokkuvõte.

Tüüp		Kogus	Võimsus (kW)
Mikro	50 kW – 100 kW	235	9677
Mini	100 kW - 1 MW	93	16622
Väike	1 MW - 10 MW	3	3609
Kokku		331	29908

Antud töös ei uurita lähemalt asukohti jõgedel, mille võimsus on väiksem kui 50 kW. Kogu potentsiaalse võimsuse arvestamisel on liidetud kokku kogu jõe hüdroenergeetiline võimsus. Edaspidi on kirjeldatud iga maakonda eraldi ning on toodud välja hüdroenergia tootmiseks optimaalsemad asukohad.



Joonis 3.12. Potentsiaalsed hüdroelektrijaama asukohad.

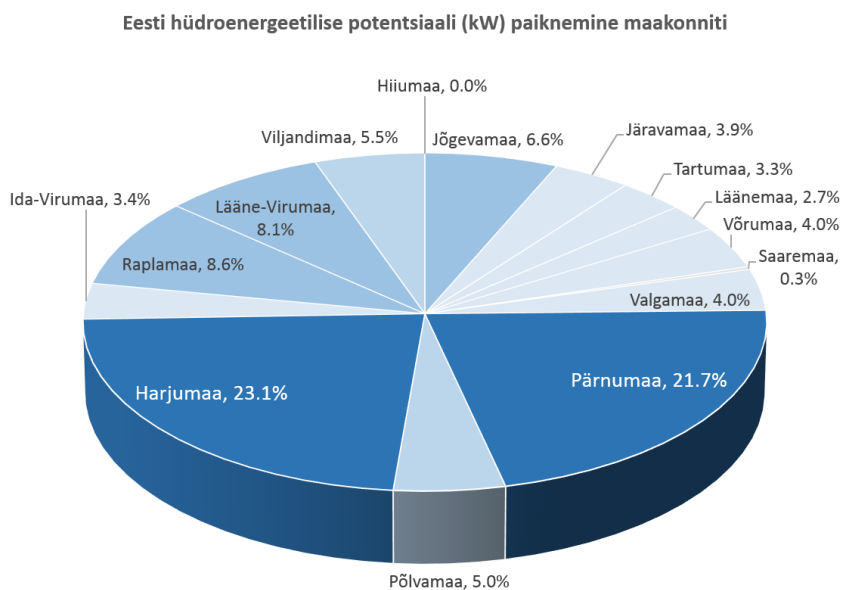


Joonis 3.13. Hüdrolektriijaamad ja nende võimsused 2004. a. Allikas EE AS Põhivõrk

3.6.1 Harjumaa

Nagu on näha joonisel 6.2, siis parimad asukohad energia tootmiseks ei jagune üle Eesti võrdselt. Kõige suurema potentsiaaliga maakond on Harjumaa, kus on teoreetiliselt 17289 kW energiat mis on protsentuaalselt kogu Eesti hüdroenergeetilisest potentsiaalist 23,1%. Suur potentsiaalne võimsus on tingitud tänu suurtele kõrgusvahedele ning veerohketele jõgedele.

Harjumaal Jägala jõel on kasutusele juba võetud suurimate potentsiaalsete võimsustega asukohad. Jägala jõest lääne pool asuval Pirita jõel on aga asukohti, kus tänasel päeval energiat ei toodeta, kuid arvutuste järgi oleks see võimalik. Parim asukoht on jõe 16. km-l, kus mudeli järgi on hüdroenergeetiline potentsiaal 380 kW. Tegelikult asub selles kohas Loo pais. Pirita jõel on veel viies erinevas asukohas teoreetilist võimsust vähemalt 100 kW, mida praegusel hetkel ära ei kasutata. Maakonna läänepoolsel küljel Keila jõe ümbruses on samuti viies erinevas kohas võimalik toota suures koguses energiat. Üks neist kohtadest on 2005. a rekonstrueeritud Keila-Joa hüdrolektriijaam võimsusega 365 kW.



Joonis 6.4. Eesti hüdroenergeetilise potentsiaali paiknemine maakonniti.

3.6.2 Pärnumaa

Pärnu jõel ei tööta hetkel ühtegi hüdroelektrijaama. Varem on toiminud sellel jõel Sindi, Suurejõe ning Jändja hüdroelektrijaamad ('Hüdroenergia tootmise võimalikkus Pärnu jõel', 2003). Antud töös kerkis arvutustes esile 33 asukohta, kus on potentsiaalne võimsus vähemalt 50 kW. Üle 200 kW potentsiaalse võimsusega asukohti on jõel seitsmes erinevas asukohas.

Navesti on Pärnu jõe üks lisajõgedest, kus on kasutamata umbes 6 erinevat asukohta, mille potentsiaalne võimsus on vähemalt 100 kW. Navesti jõel on tänasel päeval vaid üks töötav 88 kW võimsusega Tamme hüdroelektrijaam. Erinevalt Harjumaast, on Pärnumaa üsna tasase reljeefiga, seda on näha ka Delta H iseloomustavalt jooniselt 6.4, kus terve maakonna peale on ainult üksikud kohad, kus kõrguse erinevust on 500 m lõigu peale rohkem, kui 2 m. Maakonna kohta suur potentsiaalne võimsus tuleb aga jõgede veerohkusest. Kokku on maakonnas potentsiaalset hüdroenergiat 16263 kW.

3.6.3 Läänemaa

Maakonnass asub üsna veerikas Kasari jõgi. Jõel on kümnes erinevas asukohas hüdroenergeetilist võimsust vähemalt 50 kW ning kahes kohas on see üle 100 kW.

Samuti on suure hüdroenergeetilise potentsiaaliga kohti ka Kasari lisajõgedel Vigalal ning Velisel. Vana-Vigalasse on planeeritud tulevikus rajada ka hüdroelektrijaam. Kuid sellegipoolest on Läänemaal hüdroenergeetiline potentsiaal mandri maakondadest kõige väiksem, võimsus kokku 2015 kW. Põhjuseks on Läänemaa tasane pinnareljeef.

3.6.4 Ida-Virumaa

Kuna antud töös Narva jõge ei uuritud, siis ainsaks potentsiaalseks jõeks energia tootmiseks kujunes Purtse jõgi. Purtse jõe viimasel viiel kilomeetril on 26 m langust ning tänu sellele on jõel 1045 kW võimsusega hüdroenergeetiline potentsiaal. Kokku on terves maakonnas ilma Narva jõge arvestamata potentsiaalset võimsust 2564 kW.

3.6.5 Võrumaa

Kõrguserinevuste poolest oleks Võrumaa üsna hea koht hüdroenergia tootmise jaoks. Tänu Haanja kõrgustikule on Võrumaa jõgede langud suured. Võrumaal asuv Piusa jõgi on Eesti kõige suurema languga jõgi, kus kogu lang on 212 m. Kuigi Piusa jõel on paiknenud aja jooksul 39 vesiveskit, siis oma vähese vooluhulga tõttu ning üsna ühtlase langu tõttu kerkib arvutustes esile vaid üks koht, kus on potentsiaalne võimsus vähemalt 50 kW (Külvik, Helen Setomaa, Looduse raamatukogu, MTÜ Looduajakiri, 2013). Kokku on maakonnas potentsiaalset võimsust 3028 kW, mis on protsentuaalselt kogu Eesti hüdroenergeetilisest potentsiaalist ainult 4%.

3.6.6 Põlvamaa

Põlvamaal voolab kaks veerohket jõge, kus on rohkem kui 100 kW võimsusega asukohti. Nendeks on Võhandu ning Ahja jõgi. Võhandu jõel on toimivad hüdroelektrijaamad Leevakul, Leevil ning Räpinas kokku võimsusega 540 kW. Ahja jõel on Saesaare

hüdroelektrijaam võimsusega 240 kW. Arvutuste järgi asuvad kõrgeima potentsiaaliga asukohad praeguste hüdroelektrijaamade asukohtades. Kokku on potentsiaalne võimsus Põlvamaa jõgedel 3766 kW.

3.6.7 Tartumaa

Tartumaal kerkis esile vähemalt kaks 100 kW potentsiaalse võimsusega asukohta, mida praegusel hetkel energiatootmisel kasutusele pole võetud. Need asuvad Emajõel 35 km ning 45 km kaugusel suudmest. Kuigi Emajõel on suur vooluhulk, siis Tartumaa suhteliselt tasase pinnamoe tõttu on jõel vaid 3,6 m langu ning energiatootmine on üsna keeruline. Kokku on maakonnas hüdroenergeetiline potentsiaal 2443 kW ehk 3,3% kogu Eesti potentsiaalist.

3.6.8 Jõgevamaa

Jõgevamaal asub tänasel päeval vähemalt 5 töötavat hüdroelektrijaama. Arvutustes kerkis esile lõik Kullavere jõel, mis asub umbes 7 km kaugusel suudmest, kus on potentsiaalne võimsus 110 kW. Tänapäeval ei asu Kullavere jõel ühtegi hüdroelektrijaama. Arvutustes selgus, et Põltsamaa jõel on kahes kohas potentsiaalne võimsus üle 200 kW. Nendes asukohtades asuvad juba tänapäeval hüdroelektrijaamad. Üks neist on Põltsamaa hüdroelektrijaam võimsusega 185 kW ning teine on Väike-Kamari hüdroelektrijaam võimsusega 200 kW. Kokku on Jõgevamaa jõgedel hüdroenergeetiline potentsiaal 4940 kW, mis teeb kogu Eesti potentsiaalist 6,6%.

3.6.9 Viljandimaa

Tänapäeval on Viljandimaal vähemalt 6 hüdroelektrijaama võimsusega vähem kui 100 kW. Suurim neist on Kõsti hüdroelektrijaam võimsusega 87 kW. (Kõsti veski, 2016). Sarnaselt Tartumaaga, kerkis esile Viljandimaal vaid kaks kohta, kus on potentsiaalne võimsus suurem kui 100 kW.

Kuigi Viljandimaalt voolab läbi ka veerohke Navesti jõgi, siis asuvad kõik selle jõe suurima potentsiaalse võimsusega asukohad Pärnumaal.

3.6.10 Valgamaa

Sarnaselt Võrumaaga on ka Valgamaa jõgedel suured langud. Valgamaal asuv Otepää kõrgustiku pindala on umbes 1200 km². Selle läbimõõt põhjast lõunasse, kui ka idast läände on ligikaudu 40 kilomeetrit. Kõrgustiku pinna suhteline kõrgus on rohkem kui 100 meetrit. Peaaegu kõik Otepää kõrgustiku piirid on hästi nähtavad, sest neid tähistavad Rõngu ja Elva org läänes, Voika-Tatra ürgorg põhjas, Reola ja Ahja ürgorg idas. Kagusuunas Otepää kõrgustikuga liitub Karula kõrgustik ja piirid seal on väljendanud nõrgalt Urvaste ürgoru kaguosaga Sulbi–Puskaru joonel (Otepää kõrgustik, 2017).

Valga maakonna suurimad jõed on Väike-Emajõgi ning Õhne jõgi. Väike Emajõgi algab Pühajärvest ning suubub Võrtsjärve lõunapoolsesse tippu. Jõe lang on kokku 81 m, kuid kuna lang on ühtlane terve jõe jooksul ning jõgi on suhteliselt veevaene, siis ei teki ühtegi suure hüdroenergeetilise võimsusega lõiku. Sama olukord on ka Õhne jõel, kus jõe keskmine lang 0,7 m/km, kuid ühtegi potentsiaalselt head asukohta arvutustes esile ei kerki. Ülejäänud jõed Valgamaal on liiga lühikesed ning veevaesed hüdroenergia tootmise jaoks. Potentsiaalset võimsust on jõgedel kokku 2978 kW.

3.6.11 Raplamaa

Rapla maakonnas ei asu ühtegi hüdroelektrijaama. Arvutuste järgi on ainuke potentsiaalne koht, kus võimsust on rohkem kui 100 kW, Velise jõel Vängla paisjärve lähedal. Jõe lang on sellel lõigul 3,4 m/km ning potentsiaalne võimsus 108 kW.

Raplamaal on ka veerohked Vigala ning Kasari jõed, kuid nende parimad asukohad energia tootmiseks jäävad Lääne maakonda. Sellegipoolest on Raplamaal palju asukohti, kus on võimalik toota alla 100 kW võimsusega energiat. Tänu sellele on ka Rapla maakonnas potentsiaalne võimsus 6415 kW.

3.6.12 Lääne-Virumaa

Hetkel on Lääne-Virumaal hüdroelektrijaam Joaveski külas võimsusega 300 kW, ning kaks jaama Kunda linnas võimsustega 200 ja 336 kW (Joonis 6.3).

Maakonnas voolab kokku 9 jõge, mis on pikemad kui 25 km ning tänu Põhja-Eesti paekaldale on jõgede langud suudmetes suured. Lääne-Virumaa suurim ning veerohkeim jõgi on Kunda jõgi. Kunda jõe pikkus on 64 km ning vooluhulk keskmiselt 5–6 m³/s. Jõgi algab Pandivere kõrgustiku idaservalt, voolab Viru lavamaal, läbib sügavas orus Põhja-Eesti paekalda ja suubub Soome lahte. Jõe lang viimasel viiel kilomeetril on 34 m ning selle lõigupeale oleks teoreetiline võimsus 934 kW.

Arvutustes selgus, et jõgi, mida tasuks kaaluda energia tootmiseks on Selja jõgi. Alguse saab see Pandivere kõrgustikult Hulja alevikust ning suubub Karepa külas Soome lahte. Jõe pikkuseks on 44 km ning vooluhulk on 3,6 m³/s. Jõe lang on 77 m, kus viimase 4 km jooksul langeb jõgi 21 m. Sellel lõigul jõe lähtmes oleks hüdroenergeetiline võimsus 430 kW. Tänapäeval pole Selja jõele ühtegi HEJ rajatud. Põhjuseks võib olla Selja oru looduskaitse all olev lõik. Kogu maakonna potentsiaalne võimsus on 6048 kW, mis on protsentuaalselt kogu Eesti teoreetilisest võimsusest 8,1%.

3.6.13 Järvamaa

Järvamaal saab alguse Pärnu jõgi. Pärast Lintsi jõega liitumist on Pärnu jõel potentsiaalselt hea asukoht energia tootmiseks. Mudeli järgi on 1,5 km pikkusel lõigul langu 2,23 m ning tänu sellele on sellel potentsiaalseks võimsuseks 320 kW. Tegelikult asub antud lõigul Kurgja pais, kus tänapäeval hüdroenergiat ei toodeta. Kogu Järvamaa hüdroenergeetiline võimsus on 2888 kW

3.6.14 Saaremaa ja Hiiumaa

Metoodika kohaselt pidi uuritav jõgi olema vähemalt 25 km pikk. Hiiumaal ei ole ühtegi piisava pikkusega jõge, seega antud töös on Hiiumaa jõgede potentsiaalne võimsus 0 kW. Saaremaal on piisava pikkusega Lõve ja Põduste jõgi. Põduste jõgi saab alguse Tõrise külast põhjaloo pool ja suubub Kuressaare lahte Läänemeres, olles 30,5 km pikk (Põduste jõgi, 2017). Jõe lang on 31,5 m ning voolu hulk on umbes 2 m³/s. Delta H iseloomustava kaardi pealt on näha, et ühes kohas on jõe lang isegi üle 2 m, kuid see asub jõe lähtes ning vooluhulk on seal liiga väike. Kõige soodsam koht energia tootmiseks asub suudmest 10 km kaugusel ning potentsiaalne võimsus oleks 13 kW.

Lõve jõgi ehk Pahnajõgi on Lõuna-Saaremaal üks suuremaid jõgesid, mis algab Tõrise külast 2,5 km lõunakagu pool ning suubub Oessaare lahte. Jões asub ka Uus-Lõve hüdromeetrijajaam, mis aitab kõvasti kaasa vooluhulkade määramisele. Lõve jõel soodsaim koht energiat toota asub 6 km jõe suudmest ning potentsiaalne võimsus oleks 10 kW. Teoreetiliselt on kahe jõe peale kokku hüdroenergeetilist potentsiaali 197 kW.

4. DISKUSSIOON

Metoodika esimene katsetus tehti läbi Keila jõe näitel, kus analüüsiti kõrguskaardi resolutsiooni valikut ning punktivahekauguste valikut ja nende mõju lõpptulemusele. Võrreldi omavahel arvutustes saadud andmeid tegelikkuses paiknevate paisude ning HEJ asukohtadega. Katsetamise käigus selgus, et optimaalne kõrguskaardi resolutsioon antud tööks on 10x10 m. Piisava täpsusega informatsiooni saame jõe kohta koostades virtuaalne HEJ iga 500 m tagant. Samuti saadi kõrguskaardilt igale vHEJ absoluutne kõrgus. Keila jõe puhul võrreldi absoluutseid kõrgusi tegelike andmetega ning erinevused olid küllalt väikesed, jäädes vahemikku 5-10%.

Hüdroenergeetilise potentsiaali määramisel kasutati kõiki Eesti jõgesid, mille pikkus on vähemalt 25 km. Antud 25 km pikkuse kriteeriumile vastavad jõed jagati omakorda 500 meetrilisteks lõikudeks, mis oleksid kui virtuaalsed hüdroelektrijaamad (VHEJ). Antud töös jäi arvutustes välja Narva jõgi, kuna jõe valgala asub osaliselt Venemaa territooriumil ning kõrguskaart mahutas ainult andmeid Eesti kohta.

Antud töös üheks olulisemaks etapiks oli iga vHEJ valgala piiritlemine. Perspektiivselt heade asukohtade leidmisel on vaja igas virtuaalses jaamas teada absoluutset kõrgust kui ka valgala suurust. Jõgede koguvõimalasid võrreldi Riigi Ilmateenistuse lehel olevate andmetega ning väärtuste erinevus jäi enamjaolt 1-10% vahele. Antud viga on piisavalt väike hindamaks Eesti hüdroenergeetilist potentsiaali.

HEJ võimsuse arvutamiseks on lisaks tööriistade vajalik leida ka vooluhulk Q . Antud töös oli vajalik leida igale vHEJ vastav vooluhulk ning selle jaoks kasutati äravoolumooduli kaarti. Valgala ning äravoolumooduli kaudu leitud vooluhulki võrreldi tegelikkusega ning Keila jõe puhul jäi erinevus tegelikkusega 9,2%. HEJ võimsuse arvutustes selgus, et Keila jõel on kuues asukohas hüdroenergeetiline võimsus rohkem kui 50 kW

Seisuga 2011. aasta märts, oli Eesti elektrivõrkudesse ühendatud 47 erinevat hüdroelektrijaama ja elektrit tootvat vesiveskit, võimsuste vahemikus 4 kW kuni 2 MW, koguvõimsusega 8,09 MW. Aastatel 2011–2020 on oodata jaotusvõrkudesse 9 täiendava mini- ja mikrohüdroelektrijaama liitumist koguvõimsusega 1,224 MW, tehes koguvõimsuseks 9,314 MW. Nii on 1948. a. T. Eipre uurimistöös hinnanud energeetiliseks potentsiaaliks (50% tõenäosusega tagatud vooluhulkadel) Narva jõel 72,7 MW ja ülejäänud jõgedel 18,6 MW.

Potentsiaalne võimsus 117 jõe peale kokku on 75 MW, mis teeb hüdroenergeetiliseks potentsiaaliks umbes 500 GWh. Tegelikuses on sellest reaalselt kasutatav võimsus aga väiksem. Välistades asukohad, kus potentsiaalne võimsus on vähem kui 50 kW, saame kogu Eesti teoreetiliseks võimsuseks vaid 30 MW ning potentsiaalseks energiaks umbes 199 GWh. Kuid tehniliselt kasutatav potentsiaal võib olla veelgi väiksem, sõltudes asukohatingimustest ja turbiinide valikust. Antud töös pole ka arvestatud keskkonnale määratud piirangutega, mistõttu võib tegelik potentsiaalne võimsus veelgi väiksemaks kujuneda. Nii on 1948. a. T. Eipre uurimistöös hinnanud energeetiliseks potentsiaaliks (50% tõenäosusega tagatud vooluhulkadel) Narva jõel 72,7 MW ja ülejäänud jõgedel 18,6 MW. Võrdlusi raskendab ka tõsiasi, et antud metoodikaga saab hinnata vaid *run of the river* tüüpi hüdroelektrijaamau, kuid mõnel varem koostatud hinnangul on võimalus, et on arvestatud ka vee paisutamise võimalust.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli hinnata terve Eesti hürdoenergeetilist potentsiaali, kasutades ArcMAP tarkvara. Lisaks oli eesmärk leida Eesti jõgedel potentsiaalselt head asukohad energiatootmiseks ning analüüsida asukohti, kus senimaani energiatootmist arendatud pole. Metoodika valimisel katsetati erinevaid sisendeid töövõtete optimeerimiseks, kus täpseimad tulemused saadi kasutades 10m resolutsiooniga kõrguskaarti. Virtuaalsete hüdroelektrijaamade loomisel saadi piisavalt täpsed tulemused 500 m vahekauguste juures. Saadud tulemusi võrreldi tegelikkuses asuvate hüdroelektrijaamadega ning hinnati tekkinud erinevusi. Antud metoodikat on võimalik kasutada just „jõgede läbijooksu“ tüüpi hüdroelektrijaama asukohtade leidmiseks ning võimsuste suurusjärgu hindamiseks.

Arvutuste tulemusel leiti, et kogu Eesti hürdoenergeetiliseks võimsuseks Narva jõe arvestamata on 75 MW. HEJ vahemikus 4 kW kuni 2000 kW, on arvutuste järgi potentsiaalne koguvõimsus 68,3 MW ning sellest on tänasel päeval kasutusel 13,3%.

Arvutustes selgus, et tänasel päeval on Pärnu jõgi kasutamata jätnud suurima hürdoenergeetilise potentsiaali võimsusega kokku 10 MW. Lisaks Pärnu jõe leiti ka palju kasutamata potentsiaalset energiat: 1)Selja jõel, 2)Pirita jõel, 3)Purtse jõel, 4)Kasari jõel, 5)Navesti jõel.

Potentsiaali hindamiseks kasutati metoodikat, kus on vaja ainult kahte sisendit. Kasutades kõrguskaarti ja äravoolumoodulikaarti, tehti läbi tarkvara sisesed protseduurid, et saada võimsuse arvutamiseks vajalikud väärtused. Töörõhu H hindamiseks kasutati kõrguskaartilt saadud andmeid. Vooluhulga Q määramiseks kasutati äravoolumoodulikaarti koos valgalade piiritlemisest saadud infoga. Eesmärgiks oli hinnata potentsiaalsete hüdroelektrijaamade asukohti ning need suudeti määrata piisavalt suure täpsusega. Antud töös suudeti tuvastada kõik olemasolevad hüdroelektrijaamad ning lisaks leiti ka asukohti, kus senimaani elektrienergia tootmist ei toimu. Samuti saadi potentsiaalsete hüdroelektrijaamade võimsuse suurusjärgu hindamisel piisavalt täpsed tulemused. Antud meetodiga oleks võimalik hinnata hürdoenergeetilist potentsiaali ka väljaspool Eestit. Meetodi lihtsus võimaldab hinnata ka Eestist suuremate riikide hürdoenergeetilist potentsiaali kasutades minimaalselt inimressurssi.

Antud töös ei arvestatud keskkonnavalaste piirangutega. Potentsiaalsete hüdroelektrijaamade asukohtade valimisel oleks vaja edaspidi analüüsida piiranguid ning välistada asukohad, kus

jaama rajamine ei ole võimalik. Kuid on selge, et kogu jõgede potentsiaalne energia kokku on kordades väiksem, kui võrku ühendatud tuulikute võimsus tänasel päeval. Üheks variandiks oleks võtta kasutusele tuulepark koos pumpejaamaga.

KASUTATUD KIRJANDUS

Andres, A. et al. (2011) 'Tartumaa taastuvate, olme- ja tööstusjäätmete energiaressursside ülevaade'.

Bartle, A. (2002) 'Hydropower potential and development activities', *Energy Policy*, 30(14), pp. 1231–1239.

François, B. et al. (2016) 'Increasing climate-related-energy penetration by integrating run-of-the river hydropower to wind/solar mix', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 87, pp. 686–696. doi: 10.1016/j.renene.

Hüdroelektrijaam (2016) *Energiatalgud*. <https://energiatalgud.ee/index.php?title=Hüdroelektrijaam> (30 April 2018).

'Hüdroenergia tootmise võimalikkus Pärnu jõel' (2003) *merin ltd. consulting engineers*. https://energiatalgud.ee/img_auth.php/e/e2/Merin_AS._Hüdroenergia_tootmise_võimalikkus_Parnu_jõel.pdf (8 May 2018).

Jaanus Uiga (2016) *Hüdroenergia ressurss, Energiatalgud*. https://energiatalgud.ee/index.php?title=Hüdroenergia_ressurss#H.C3.BCdenergia_potentsiaal_Eestis (30 April 2018).

Keila-Joa hüdroelektrijaam (2017) *Vikipeedia*. https://et.wikipedia.org/wiki/Keila-Joa_hüdroelektrijaam (7 May 2018).

Keila hüdromeetriaajaam (2017) *Riigi Ilmateenistus*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/keila-hudromeetriaajaam/> (2 May 2018).

Kirumpää hüdromeetriaajaam (2015) *Riigi Ilmateenistus*. <https://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/kirumpaa-hudromeetriaajaam/> (7 May 2018).

Kmh, R. K. (2017) 'Eesti pump-hüdroakumulatsioonijaama hoonestusloa keskkonnamõju hindamine Keskkonnamõju hindamise programm seisukohtade', (2728).

Koduvere, H. (2016) *Elektri tootmine, Energiatalgud*. https://energiatalgud.ee/index.php?title=Elektri_tootmine (30 April 2018).

Koppel, K. (2018) 'Riik otsib hankega Sindi paisu lammutajat', *ERR*. <https://www.err.ee/684326/riik-otsib-hankega-sindi-paisu-lammutajat> (1 May 2018).

Kösti veski (2016) *Weskiwiki*. http://weskiwiki.veskivaramu.ee/index.php?title=Kösti_veski (9 May 2018).

Lahtvee, V. (2003) *Põlevkivienergiast niipea ei pääse, Eesti Loodus*.
http://www.eestiloodus.ee/artikkel522_516.html (30 April 2018).

Leevaku hüdroelektrijaam (2017) *Vikipeedia*.
https://et.wikipedia.org/wiki/Leevaku_hydroelektrijaam (7 May 2018).

Loigu, E., Reihan, A. and Reinsalu, K. (2012) 'Sanitaarvooluhulkade arvutamine ja paisutustaseme mõõtmine', *Keskkonnainvesteeringute keskus*, p. 27.

Manzano-Agugliaro, F. et al. (2017) 'An overview of research and energy evolution for small hydropower in Europe', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 75(May 2015), pp. 476–489.

Oore hüdromeetriaajaam (2017) *Riigi Ilmateenistus*.
<https://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/oore-hudrometriaajaam/> (2 May 2018).

Otepää kõrgustik (2017) *Vikipeedia*. Available at: https://et.wikipedia.org/wiki/Otepää_korgustik (9 May 2018).

Pärnu jõe põhiaandmed (2017) *Keskkonnainfo*:
<http://register.keskkonnainfo.ee/envreg/main#HTTPIF0Hcxc0hqCZbxLNR9wkmxcnTA4Vko> (1 May 2018).

Põduste jõgi (2017) *Keskkonnaagentuur*.
http://loodus.keskkonnainfo.ee/eelis/default.aspx?comp=objresult=veekogu&obj_id=-1135578039 (10 May 2018).

Punys, P. et al. (2011) 'Tools for small hydropower plant resource planning and development: A review of technology and applications', *Energies*, 4(9), pp. 1258–1277.

Quaschnig, V. (2015) *Turbine efficiency, Tidal Barrage*.
http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/14-15/Tidal_barrage/turbine.html (4 May 2018).

Raesaar, P. (2005) *Eesti veejõu kasutamisest. Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine : kuuenda konverentsi kogumik*. Tartu.

Räpina hüdromeetriaajaam (2015) *Riigi Ilmateenistus*.
<https://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/rapina-hudrometriaajaam/> (7 May 2018).

Riigi Ilmateenistus (2012) *Sõnastik, Riigi Ilmateenistus*.
<https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/sonastik/> (30 April 2018).

Soomets, S. (2017) 'Keila jõe hüdroenergeetilise potentsiaali modelleerimine kasutades Hype mudelit'.

http://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/3445/Sander_Soomets_VE_ehin_2017.pdf?sequence=1 (4 May 2018).

Tambets, J., Järvekülg, R. and Tambets, M. (2007) *Eestis ei ole hüdroenergia roheline, Eesti Loodus*. http://www.eestiloodus.ee/artikkel1993_1972.html (30 April 2018)

LISAD

F. Manzano-Agugliaro et al.

Renewable and Sustainable Energy Reviews 75 (2017) 476–489

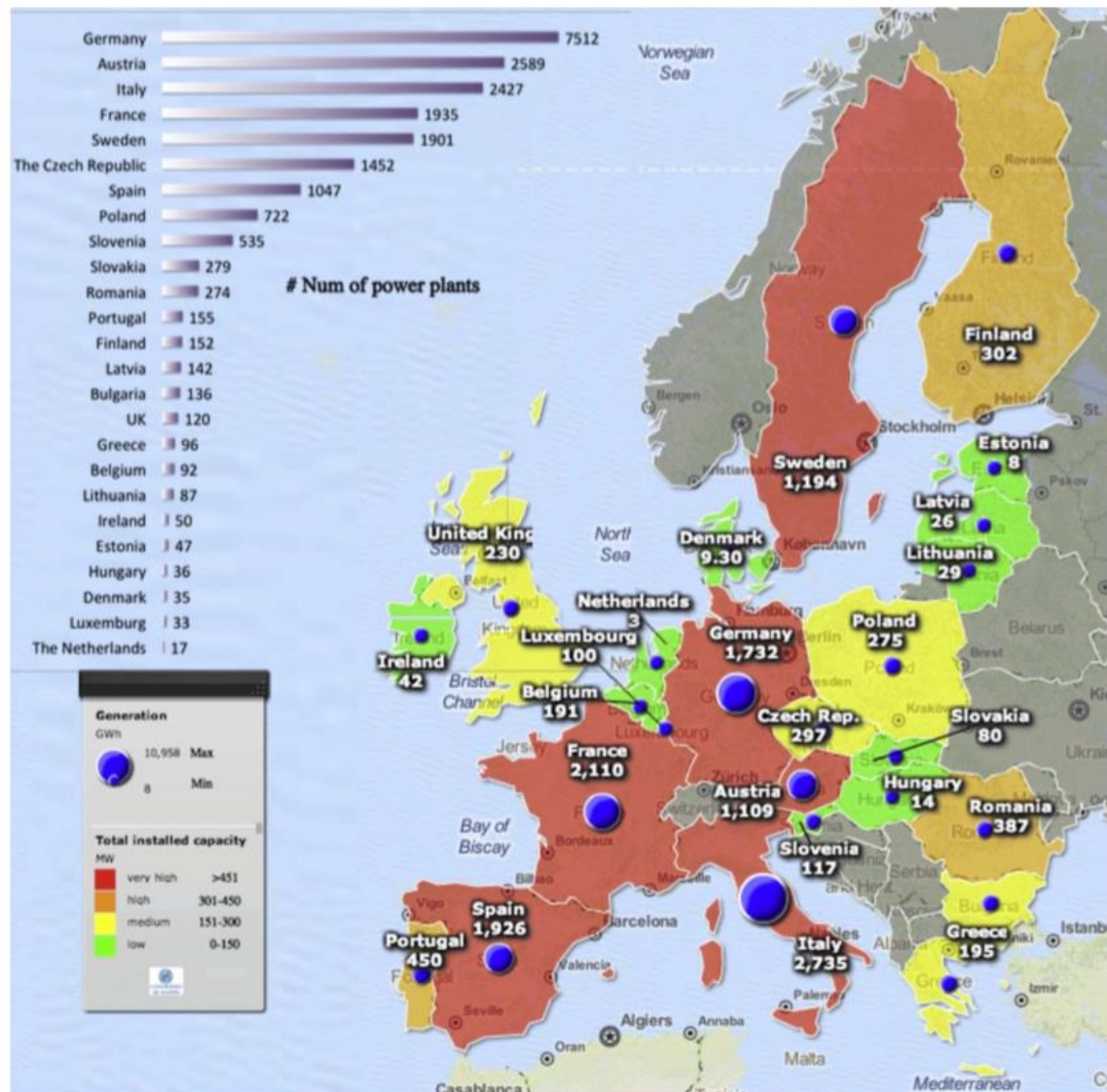
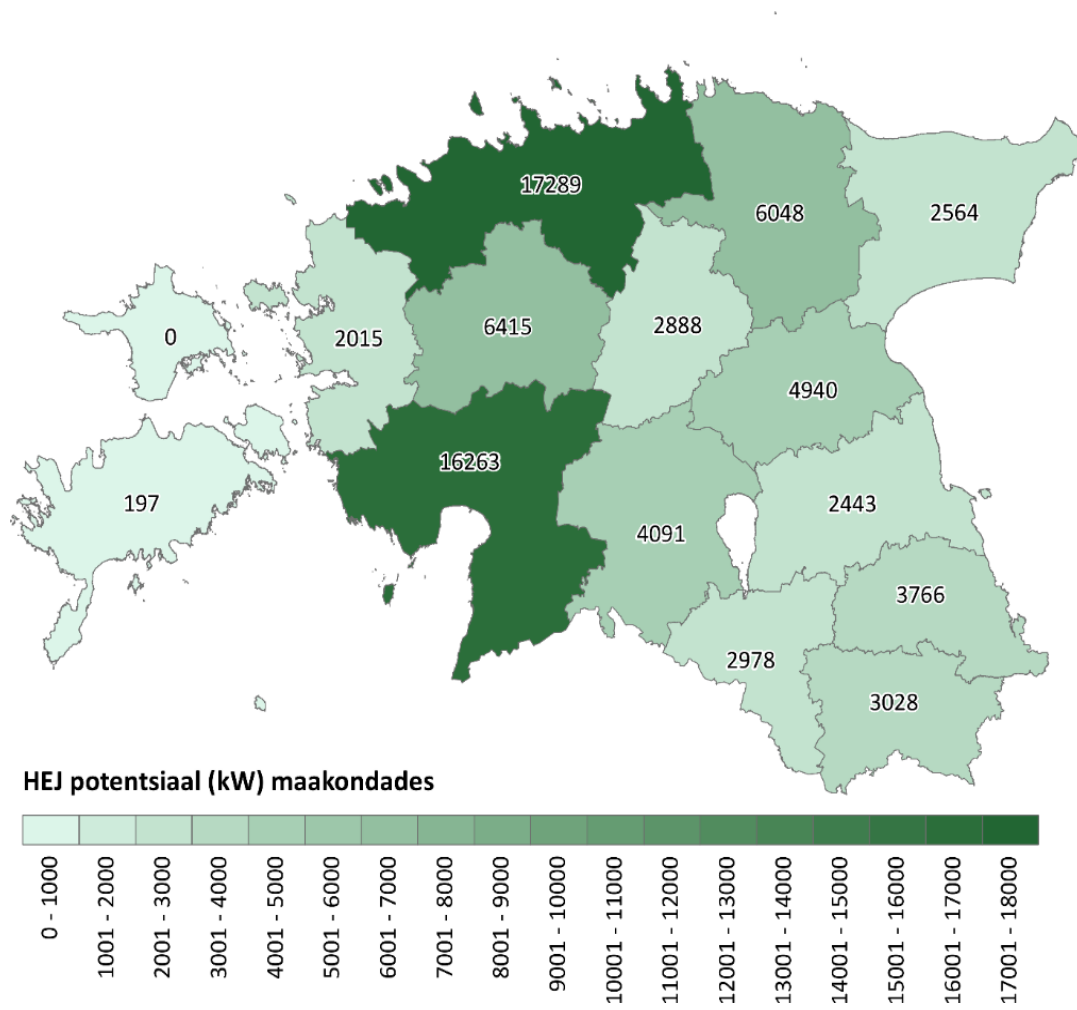


Fig. 1. Map of 25 top European Countries of total installed capacity SHP, total generation energy SHP and number of SHPs. (2010).

Lisa 1. Hüdrolektriijaamade arv Euroopa riikides



Lisa 2. Eesti hüdroenergeetilise potentsiaali paiknemine maakonniti

Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Heiko Kaljuvee,

(sünnipäev 02/05/1991, 39105026524)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö Eesti hüdroenergeetilise potentsiaali arvutamine, mille juhendaja on Ottar Tamm,

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 28.05.2018

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)